



TITLE:

マスコンクリートの温度ひびわれ
危険度評価ならびに温度応力のリ
ラクセーション解析に関する基礎
的研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

森本, 博昭

CITATION:

森本, 博昭. マスコンクリートの温度ひびわれ危険度評価ならびに温度
応力のリラクセーション解析に関する基礎的研究. 京都大学, 1990, 工
学博士

ISSUE DATE:

1990-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r7155>

RIGHT:

マスコンクリートの
温度ひびわれ危険度評価ならびに温度応力の
リラクセーション解析に関する基礎的研究

平成元年10月

森 本 博 昭

マスコンクリートの
温度ひびわれ危険度評価ならびに温度応力の
リラクセーション解析に関する基礎的研究

平成元年10月

森 本 博 昭

目次

第1章 緒論

1.1 序論	1
1.2 本論文の構成	4
<参考文献>	6

第2章 マスコンクリートの温度応力解析および温度ひびわれ予測、ならびに、 温度応力のリラクセーション解析に関する研究の現状

2.1 概説	9
2.2 温度応力解析	9
2.2.1 温度解析	9
(1) 温度物性	9
(2) 温度解析手法	14
2.2.2 温度応力解析	15
(1) 圧縮強度、弾性係数、ポアソン比および熱膨張係数	15
(2) 温度応力厳密解析手法	19
(3) 温度応力簡易解析手法	20
2.3 温度ひびわれ予測	25
2.3.1 温度応力解析にもとづく予測手法	26
(1) 引張強度と引張ひずみ能力	26
(2) 温度応力解析にもとづく温度ひびわれの危険度評価	28
2.3.2 その他の予測手法	29
2.4 温度応力のクリープならびにリラクセーション解析手法	30
2.4.1 リラクセーション特性	31
2.4.2 クリープ特性	32
2.4.3 クリープならびにリラクセーション厳密解析手法	34
2.4.4 クリープならびにリラクセーション簡易解析手法	35
<参考文献>	37

第3章 マスコンクリートの温度ひびわれ危険度評価に関する研究

3.1 概説	48
--------	----

3.2 温度ひびわれ予測手法	49
3.2.1 温度解析	49
(1) 熱的性質	49
(2) 解析手法	52
3.2.2 温度応力解析	52
(1) 弾性的性質	52
(2) 解析手法	53
3.2.3 温度応力のクリープ解析	53
(1) クリープ関数	53
(2) 解析手法	55
3.2.4 温度応力解析精度の検証	56
(1) コンクリートの力学的性質と有効材令	56
(2) 温度応力解析精度の検証	57
3.2.5 温度ひびわれ危険度評価	59
(1) 温度上昇特性にもとづく危険指数	59
(2) 応力と強度にもとづく危険指数	59
(3) ひずみとひずみ能力にもとづく危険指数	60
(4) 土木学会コンクリート標準示方書規定の危険指数	62
3.3 解析対象構造物	63
3.4 温度ひびわれ予測結果および考察	64
3.4.1 マスコンクリートにおける温度ひびわれの危険性	64
3.4.2 各種ひびわれ危険指数による危険度評価とそのばらつき	65
(1) 温度上昇特性にもとづく危険指数	65
(2) 応力と強度にもとづく危険指数	65
(3) ひずみとひずみ能力にもとづく危険指数	66
(4) 土木学会コンクリート標準示方書規定の危険指数	66
3.4.3 各種危険指数の適用性の評価	67
3.5 まとめ	68
<参考文献>	70
第4章 若材令コンクリートのリラクセーション特性とその評価法に関する 実験的研究	
4.1 概説	94

4.2 圧縮リラクセーション特性とその評価法	95
4.2.1 圧縮リラクセーション関数	95
4.2.2 実験計画	96
(1) 実験方法	96
(2) 载荷装置	97
(3) 供試体	97
4.2.3 実験結果および考察	97
(1) 圧縮リラクセーション特性に及ぼす载荷応力レベルの影響	97
(2) 圧縮リラクセーション特性に及ぼす载荷材令の影響	98
(3) 圧縮リラクセーション特性に及ぼす配合の影響	98
(4) 圧縮リラクセーション特性の評価法	99
4.3 引張りリラクセーション特性とその評価法	100
4.3.1 引張りリラクセーション関数	100
4.3.2 载荷フレームの剛性についての検討	100
4.3.3 実験計画	102
(1) 実験方法	103
(2) 供試体	103
4.3.4 実験結果および考察	103
(1) 引張りリラクセーション特性に及ぼす载荷応力レベルの影響	103
(2) 引張りリラクセーション特性に及ぼす载荷材令の影響	104
(3) 引張りリラクセーション特性に及ぼす配合の影響	104
(4) 引張りリラクセーション特性の評価法	105
4.4 圧縮リラクセーション特性と引張りリラクセーション特性の比較	105
4.5 クリープデータを用いたリラクセーション特性の推定	106
4.5.1 リラクセーション特性の簡易推定法	107
(1) Trostの変形式	107
(2) Hansenの方法	107
4.5.2 リラクセーション特性の推定	109
(1) クリープデータ	109
(2) リラクセーション特性の推定結果および考察	110
4.6 まとめ	110
<参考文献>	112

第5章 マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析に関する研究

5.1 概説	137
5.2 温度応力のリラクセーション解析手法ならびにクリープ解析手法	138
5.2.1 リラクセーション解析手法	138
5.2.2 作用応力の正負によるリラクセーション特性の相違を 考慮した解析手法	140
5.2.3 クリープ解析手法	142
5.3 解析対象構造物	142
5.4 解析方法	143
5.4.1 リラクセーション関数	143
5.4.2 クリープ関数	144
5.4.3 解析諸定数	144
5.4.4 解析ケース	145
5.5 解析結果および考察	145
5.5.1 温度解析結果	145
5.5.2 圧縮特性のみを使用したクリープ解析とリラクセーション解析	146
5.5.3 圧縮ならびに引張りリラクセーション特性を用いた リラクセーション解析	150
5.6 まとめ	151
<参考文献>	152

第6章 CP法による温度応力のリラクセーション解析に関する研究

6.1 概説	164
6.2 CP法を用いた温度応力のリラクセーション解析	164
6.2.1 温度応力解析手法	164
6.2.2 CP法	165
6.2.3 CP法を用いたリラクセーション解析手法	168
6.3 解析対象構造物	168
6.4 解析方法	169
6.4.1 リラクセーション関数	169
6.4.2 その他の解析諸定数	169
6.5 解析結果および考察	170
6.5.1 温度解析結果	170

6.5.2 CP法による解析結果と有限要素法による解析結果の 比較ならびに検討	170
6.6 まとめ	171
<参考文献>	172
第7章 結論ならびに謝辞	180

第1章 緒論

1. 1 序論

温度変化にともなうセメントコンクリートの膨張、収縮が拘束されると、コンクリートにいわゆる温度応力が発生する。温度応力のうち、コンクリート内部の温度ひずみの分布が均一でないため生じる応力を内部拘束応力、そして、部材の温度変形が既設コンクリートや岩盤などの外部要因により拘束されるために生じる応力を外部拘束応力と呼んでいる。

コンクリート構造物の温度応力は、構造物の施工から供用に至るまでの各段階において種々の原因により発生するが、なかでも構造物の施工中に発生する温度応力は、セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇が原因となるものである。コンクリート構造物で問題となるのは、多くの場合この水和熱に起因する温度応力であり、従って、「コンクリート構造物の温度応力」と言った場合は、特に断わらないかぎりこの水和熱に起因するものを意味する。以下、本論文でもセメント水和熱に起因するものを単に「温度応力」と呼ぶことにする。

さて、コンクリート構造物に発生する温度応力は、いわゆる温度ひびわれを誘起し、構造物の使用段階における漏水、中性化、鉄筋の発錆などの主要原因となり、さらに一般使用者に不安感を与えるなど、コンクリート構造物の耐久性、機能性、信頼性および外観を大きく低下させる原因となるものである。従って、構造物の計画、設計および施工の各段階において、発生する温度応力を事前に把握し、これを防止あるいは軽減するための方策について十分検討しておくことが必要となる。

コンクリート構造物における温度応力の研究は、1900年初頭、ダムコンクリートにおいて施工中にしばしば発生したひびわれの原因調査⁽¹⁾を契機に、コンクリート工学における重要なテーマとして注目されはじめるが、研究が本格化したのは1930年代に入ってからである。特に、米国では、1930年にACI 207委員会が発足し、ダムコンクリートの温度応力に関する調査、研究が組織的に行われるようになった⁽²⁾。また、米国開拓局、米国陸軍工兵隊およびTVAなどの各研究機関においても、ダムの合理的な設計および施工に関する研究の一環として、温度応力低減のための方策について精力的に研究が進められた。そして、これらの研究の成果として、パイプクーリング、ブロック方式によるコンクリートの打ち込み、ブレイクリング法および低発熱セメントの使用など、ダムコンクリートに対する温度ひびわれ防止技術の基礎がこの時期にほぼ確立された。そして、これらの技術は、基本的に変わる事なく今日まで踏襲されているのである。この事は、当時のダムコンクリートの温度ひびわれに関する研究が、温度応力の基本的発生メカニズ

ムに対するかなりの認識を基にして行われていた事を示すもので、ダムコンクリートの温度応力の理論的研究^{(3) (4) (5)}あるいは実測に関する研究⁽⁶⁾も散見される。しかしながら、この頃の研究の多くは、ダムコンクリートの打ち込み後の温度上昇を精度良く推定する手法を確立し、それによりコンクリートの温度上昇をある限度以下に抑える方策、すなわちパイプクーリングあるいはブロック分割の具体的方法を検討する事に力点が置かれ、その内容もコンクリートの熱的性質とその試験法および温度解析手法に関するもの^{(7) (8) (9) (10)}が大多数であり、温度応力あるいは温度ひびわれに関する理論的研究は比較的少ない状況にあった。当時の温度ひびわれ防止に対する一般的な認識は、コンクリートの打ち込から1ヶ月後の温度を基準として、最終安定温度までの温度降下量が温度応力に最も大きな影響を与え、温度ひびわれを防止するためには、これをある限界値（15℃程度）以下に規制する必要がある⁽¹¹⁾というものであった。ただし、この温度の限界値は主として経験から導き出されたもので、理論的あるいは実験的に十分裏付けされたものではなかったが、ダムコンクリートに関するかぎりこれでほぼ対応できたのである。このように、当時すでに温度応力の基本的発生メカニズムに関する一応の認識があったにもかかわらず、温度応力の理論的研究と関連した形で温度ひびわれ防止対策が検討されなかった大きな理由として、実際の温度応力問題に対する適切な解析手段を持たなかったことが考えられる。

さて、時代が進み1950～60年代になると、この頃の高度経済成長社会の諸要請に対応するため、各種のコンクリート構造物が大型化し、橋台、橋脚、擁壁、基礎構造物、タンクさらには原子力発電所の施設構造物など、いわゆるマッシブなコンクリート構造物が増加し、これにともない温度ひびわれ問題が改めて注目されるようになった。しかし、大型構造物におけるマスコンクリートは、従来からのダム用マスコンクリートと多くの点においてその性質が異なるため、ダムコンクリートを対象としたこれまでの研究成果を、そのままの形で適用するには多くの点で問題があった。すなわち、大形構造物におけるマスコンクリートは、ダム用マスコンクリートに比べ全般的に富配合コンクリートであり、また工程的にも、工法的にも大きな差異があった。さらに、構造物の形式も複雑、多様化し、その規模等もダムと大きく異なるものであった。このため、温度応力の発生に関しても、定性的にも、定量的にもダムコンクリートと大きく相違し、そのメカニズムもより複雑なものとなった。さらにこれに加えて、これら大型構造物に要求される品質、機能は、より高度化および多様化するに至り、従来のダム用マスコンクリートを対象として蓄積された温度ひびわれ防止対策をそのまま適用することが困難となったのである。このような状況下、マッシブな土木、建築構造物の温度応力ならびに温度ひびわれ問題が改めてコンクリート工学における重要テーマとしてクローズアップされ、各研究機関で精力的に研究がなされるようになった。この頃から、温度応力に関する研究は、合理的な温度応力解析手法とそれに基づく温度ひびわれ防止法確立の必要性から、従来からの温度制御および温度解析などに加えて、温度応力の理論的検討にも力が注がれるようになった。代表的な研究として、Zienkiewicz⁽¹²⁾、Copeland⁽¹³⁾、

さらには森⁽¹⁴⁾ 林⁽¹⁵⁾あるいは小沢⁽¹⁶⁾の論文が上げられる。そして70年代に入ると、それまでのマスコンクリートの研究を集大成した形で、ACI 207委員会⁽¹⁷⁾あるいは塚山⁽¹⁸⁾が研究成果を報告した。これらの研究は、温度応力の計算法ならびに基本的な温度ひびわれ防止法を理論的な検討のもとに提案したもので、現在でも温度ひびわれ検討の際にはしばしば参考にされており、その研究意義は大きい。さて、この時期、工学分野において大きな技術革新がもたらされた。それは、Turner らによって航空機工学の分野で有限要素法が初めて実用化されたこと⁽¹⁹⁾である。この有限要素法の実用化は、やはりこの頃に実用化された電子計算機に負うところが大きい。Turner らの研究を契機にして、他の工学分野への応用が精力的に研究され始めた。そして、Clough および Zienkiewicz らは、ダムの応力解析および温度応力解析に有限要素法の適用を試み⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、土木工学への導入に大きく貢献した。その後、有限要素法に関する応用研究が急速に進み、Visser により熱伝導問題への適用が報告され⁽²²⁾、さらには Greenbaum らによりクリープ問題への応用が試みられた⁽²³⁾。このようにして、有限要素法の適用範囲が急速に拡大し、1970年初頭までには工学分野における強力な数値解析手法としてその基礎を確立したのである。温度応力の分野に関しては、有限要素法の出現により温度解析、温度応力解析および温度応力のクリープ解析もしくはリラクセーション解析を系統的に行うことが可能となり、しかも構造物の形状、施工条件およびコンクリートの諸物性などを、より実状に即した形で解析に反映させることが可能となった。そして、70年代後半以降は、有限要素法などの数値解析手法を適用した温度応力解析に関する研究⁽²⁴⁾がさらに増加し、最近では、有限要素法にくらべて計算規模を縮小することができる有限プリズム法あるいは境界要素法の導入⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾、さらには、温度ひびわれを考慮した解析なども試みられている⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。また、1982年には、日本コンクリート工学協会においてマスコンクリートの温度応力研究委員会が組織され、温度応力の発生メカニズムに関して広範囲にわたる研究活動が開始された。そして、その活動成果の1つとして、温度応力における外部拘束効果に関する新しい概念にもとづく温度応力解析手法である Compensation Plane 法が提案された⁽²⁹⁾。以上で述べたように、多くの研究者の努力により現在では温度応力の解析手法についてはほぼ確立された段階に達したと言えよう。ただし、実際の構造物を対象にして精度の良い温度応力解析を行おうとすると、解析で用いる材料諸定数の評価法、力学的および熱的境界条件の設定、さらには、温度応力のクリープ解析手法などについて不十分な点がなおいくつか残されているのが現状である。このうち、若材令コンクリートの力学的性質および熱的性質などに関しては、RILEM 42-CEA 委員会が今までの研究成果を総括、報告している⁽³⁰⁾が、その中で特に力学的性質については、今後さらに多くの研究ならびに実験データの広範囲にわたる蓄積が必要であることを指摘している。また、温度応力のクリープ解析手法についても、現在、簡易解析手法から厳密解析手法まで種々の手法が提案されているが、各手法とも理論面と実用面の両面において、なお検討の余地が多く残されているのが現状である。

つぎに、温度ひびわれの防止について、前述のようにダムコンクリートでは主として経験から導き出された温度規制値をもとに、各種の温度ひびわれ対策が実施されてきた。しかし、1970年代以降の温度応力解析手法の進歩により、各種のマスコンクリートにおいて、温度ならびに温度応力解析をもとに温度ひびわれにおよぼす各種施工要因の影響を総合的に検討することが可能となった。しかし、その際重要となるのが温度ひびわれに対する危険度の評価であり、これが適切でない場合は最終的に実施される温度ひびわれ対策が全く無意味なものになってしまう恐れさえある。温度ひびわれの危険度を的確に評価するためには、その基礎となる温度ならびに温度応力解析の精度の改善に加えて、危険度の評価手法についても十分検討しておくことが必要となる。さて、温度ひびわれ危険度の評価を行う場合、従来から一般的に、温度応力がコンクリートの引張強度を上回ったときに温度ひびわれが発生するという確定論的な評価法が採用されてきた⁽¹⁸⁾。しかし、ひびわれ発生は、本質的に確率的事象であるから、その危険度評価も確率論的に、もしくは、ばらつきを考慮して行う必要があると考えられる。また、ひびわれ危険度の判断基準についても、従来から慣用されてきた温度応力と引張強度との対比とて必ずしも確立されたものとはなっておらず、その他の判断基準、例えばひずみとひずみ能力との対比などによってもひびわれの危険度評価が可能であることから⁽³¹⁾、なお多くの検討の余地を残している。最近、温度ひびわれの危険度を表す指数と温度ひびわれ発生確率との関係より、温度ひびわれ危険度の評価を試みた研究⁽³²⁾⁽³³⁾が報告された。また、昭和61年度版コンクリート標準示方書においてマスコンクリートに関する内容が大幅に改訂され、温度ひびわれ制御に関しては、温度ひびわれ指数をある一定の範囲内に収めるように推奨している⁽³⁴⁾。このように、温度ひびわれ危険度評価についても、合理的な手法の確立を目指して精力的に研究が進められておりその成果も次第に上がりつつあるが、現状ではまだ多くの検討事項が残されているとともに、資料の蓄積も不十分な段階にある。

本論文は、以上に述べたような温度応力解析ならびに温度ひびわれ危険度評価に関する研究の現状と問題点を踏まえて、温度応力解析手法ならび温度ひびわれ危険度評価手法の合理化および精度向上を計る上で重要と考えられる諸課題のうち、理論的ならびに実験的な検討が特に不足している諸点、すなわち、温度ひびわれ危険度評価におけるばらつきと適用性、および温度ひびわれ問題検討の基礎となる温度応力解析の合理化と精度の向上を計る上で重要となる若材令コンクリートのリラクセーション特性とその評価法、さらには、リラクセーション関数を導入した温度応力のリラクセーション解析手法などについて論じたものである。

1. 2 本論文の構成

本論文は、マスコンクリートの施工段階においてしばしば発生する温度ひびわれの危険度評価

手法、ならびに、温度ひびわれの原因となる温度応力のリラクセーション解析手法およびリラクセーション解析において重要となる若材令コンクリートのリラクセーション特性とその評価法について論じたもので、その構成は7章からなっている。

まず、第2章では、主として温度応力の理論的研究が本格化した1960年代以降におけるマスコンクリートに関する研究のうち、特に本論文と関係の深い温度解析、温度応力解析、温度応力のリラクセーション解析ならびに温度ひびわれ予測についての既往の研究について、その成果と問題点を指摘して、本研究と従来の研究との関係ならびに本研究の位置づけを明確にする。

第3章では、マスコンクリートの温度ひびわれ危険度評価のばらつきと適用性などを明らかにする。従来からの温度ひびわれ予測では、温度応力と引張強度との大小比較をもとに、温度ひびわれの発生が確定論的に評価されてきた。しかし、ひびわれ危険度評価の基礎となる温度応力と引張強度には、種々の原因により避けがたい誤差およびばらつきが含まれる。従って、合理的なひびわれ危険度評価を行うためには、これら誤差とばらつきを考慮する必要がある。本章では、温度ひびわれ危険度の評価に用いられるいくつかの代表的な指数について、まず、指数算出の基礎となる温度ならびに温度応力解析手法の詳細と精度を明らかにした上で、多数の構造物についての解析結果とひびわれ観察結果をもとに、各指数とひびわれ発生との対応および各指数の適用性を明らかにして、温度ひびわれの危険度を合理的に評価するための有力な資料を提示する。

第4章では、若材令コンクリートの圧縮ならびに引張ひずみ拘束下におけるリラクセーション特性とその評価法などについて述べる。温度ひびわれ問題検討の基礎となる温度応力の解析精度向上には合理的なコンクリート構成式が不可欠となる。コンクリートのリラクセーション特性は、コンクリートの粘弾性構成式を記述する上で必要となる重要な力学的性質であるにもかかわらず、これに関する資料は極めて少ないのが現状である。これは、リラクセーション試験が、クリープ試験などに比べて一般に実施が困難であることが最大の理由として考えられる。本章では、供試体のひずみ制御を精度良く行うことに重点を置いて構築したリラクセーション試験システムにより、若材令コンクリートの圧縮ならびに引張リラクセーション試験を実施し、リラクセーション特性に及ぼす載荷材令、載荷ひずみ（載荷応力）レベルおよび配合の影響を明らかにする。また、得られた実験成果をもとにリラクセーション特性の評価法を提案するとともに、圧縮下の特性と引張下の特性の比較ならびにクリープデータによるリラクセーション特性の簡易推定法などについても言及する。

第5章では、マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析手法を提案する。温度ひびわれ危険度評価手法、さらには温度ひびわれの防止および制御手法を確立するためには、精度の良い実用的な温度応力解析手法を確立しておくことが前提となる。温度応力は、コンクリートのリラクセーション挙動に大きく影響されるので、解析においてはこれを合理的に考慮する必要がある。従来から、温度応力のリラクセーション解析においてコンクリートの粘弾性構成式を記述

する際には、一般的にクリープ関数が用いられてきた。しかし、温度応力の緩和現象を解析する際のコンクリート粘弾性構成式には、クリープ関数よりむしろリラクセーション関数を用いた方が直接的で、物理的意味も明快であると考えられる。本章では、第4章で得られた若材令コンクリートのリラクセーション関数を用いて記述したコンクリート粘弾性構成式を用いて、2，3の実構造物を対象とした有限要素法による温度応力のリラクセーション解析を実施する。そして、得られた解析結果と従来からのクリープ関数を用いた解析結果との比較、ならびに各解析結果と実測値との対応などから、本章で提案する温度応力のリラクセーション解析手法の有用性を明らかにする。

第6章では、Compensation Plane 法による温度応力のリラクセーション解析手法を提案する。Compensation Plane 法（以下、本論文ではCP法と呼ぶことにする）は、昭和61年度制定土木学会コンクリート標準示方書において、温度応力の解析手法として推奨されており、今後各方面で広く用いられるものと考えられる。本章では、第4章で得られた若材令コンクリートのリラクセーション関数を導入した CP法による温度応力のリラクセーション解析手法を提案し、実測値ならびに有限要素法との比較などからその適用性を検証する。

第7章では、第1章から第6章までに得られた研究の成果を総括するとともに、マスコンクリートの温度応力ならびに温度ひびわれに関する研究の今後に残された課題を指摘して、本論文の結論とする。

<参考文献>

- (1) Raymondo E. Davis : Historical Account of Mass Concrete, ACI SP-6, pp. 1~35, 1962
- (2) Raymondo E. Davis, and G. E. Troxell : Properties of Mass Concrete. Report of Committee 108, A Summary of Existing Data with a Suggested Program of Investigation, ACI Jour., Proc., Vol. 27, No. 5, pp. 385~418, 1931
- (3) Howard G. Smith : Photo-Elastic Determination of Shrinkage Stresses, Tran., ASCE, Vol. 101, pp. 927~944, 1936
- (4) R. F. Blanks, H. S. Meissner, and C. Rawhouser : Cracking in Mass Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 34, No. 4, PP. 477~495, 1938
- (5) Roy W. Carlson : Temperatures and Stresses in Mass Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 34, No. 4, pp. 497~515, 1938
- (6) Douglas McHenry and Roy W. Carlson : Measuring Dam Behavior, Engineering News Record, Vol. 122, No.13, pp. 440~442, 1939

- (7) Byram W. Steele : Mass Concrete Research for Hoover Dam, ACI Jour., Proc., Vol. 29, No. 7, pp. 305~317, 1933
- (8) Robert E. Glover : Flow of Heat in Dams, ACI Jour., Proc., Vol. 31, No. 1, pp. 113~124, 1934
- (9) Roy W. Carlson : A Simple Method for Computation of Temperature in Concrete Structures, ACI Jour., Proc., Vol. 34, No. 2, pp. 89~102, 1937
- (10) Douglas McHenry : Measured and Computed Temperatures of Concrete at Norris Dam ACI Jour., Proc., Vol. 34, No. 2, pp. 117~125, 1937
- (11) U. S. Bureau of Reclamation : Cooling of Concrete Dams, Final Reports, Boulder Canyon Project, Part VII, Bull. 3, 1949
- (12) Olgierd C. Zienkiewicz : The Computation of Shrinkage and Thermal Stresses in Massive Structures, Proc., ICE (London), Vol. 4, Part I, pp. 88~100, 1955
- (13) R. E. Copeland : Shrinkage and Temperature Stress in Masonry, ACI Jour., Proc., Vol. 53, No. 8, pp. 769~780, 1957
- (14) 森 忠次 : 一辺が拘束された三角形ならびに四角形板の熱応力の拘束度について, 土木学会論文集, 第89号, pp. 45~53, 1963
- (15) 林 正夫, 北原義浩, 金川 忠 : 非均質, 任意形状の物体の温度応力の解析法, 電力中央研究所報告, No. 67063, 1967
- (16) 小沢章三 : マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究, 京都大学学位論文, 1962
- (17) ACI Committee 207 : Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 70, No. 7, pp. 445~489, 1973
- (18) 塚山隆一 : マッシュな鉄筋コンクリートの温度上昇ならびに温度ひびわれに関する基礎研究, 東京大学学位論文, 1974
- (19) M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and L. J. Topp : Stiffness and Deflection Anarysis of Complex Structres, Jour. Aeronautical Science, Vol. 23, No. 9, 1963
- (20) R. W. Clough and E. L. Wilson : Stress Anarysis of Gravity Dam by the Finite Element Method, RILEM Bull., No. 9, 1963
- (21) O. C. Zienkiewicz and Y. K. Chaung : Stress in Buttress Dams, Water Power, Vol. 17, No. 2, pp. 69~75, 1965

- (22) W. Visser : A Finite Element Method for the Determination of Non-Stationary Temperature Distribution and Thermal Deformations, Proc. the 1st Conference of Matrix Method in Structural Mechanics, pp. 925~943, 1966
- (23) G. A. Greenbaum and M. F. Rubinstein : Creep Anarysis of Axisymmentric Bodies Using Finite Elements, Nuclear Engineering and Design 7, pp. 379~397, 1968
- (24) たとえば、原口 晃, 田辺忠顕, 阿部博俊, 内田敏久 : 重力式コンクリートダムのかさ上げ時における温度応力解析, コンクリート工学, Vol. 15, No.10, pp. 18~26, 1977
- (25) 山下祐司, 田辺忠顕 : 有限プリズム法による温度応力解析法と解析例, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 59~64, 1984
- (26) 椿 龍哉 : 外部拘束を受けるマスコンクリートの温度応力解析における境界要素の適用, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 83~86, 1984
- (27) 森本博昭, 小柳 治 : コンクリート構造物の温度ひびわれの数値シミュレーション, 土木学会第38回年次学術講演会概要集 第5部, pp. 393~394, 1983
- (28) 今枝靖典, 西岡 哲, 田辺忠顕 : クラック面を有するコンクリート構造体の温度応力および温度変形, 土木学会第41回年次学術講演会概要集 第5部, pp. 357~358, 1986
- (29) マスコンクリートの温度応力研究委員会 : 外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案, マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1985
- (30) RILEM Commission 42-CEA : Properties of Set Concrete at Eariy Ages, State of Art Report, RILEM, Vol. 14, No. 84, pp. 399~450, 1981
- (31) たとえば、西 忠雄 : 建築物におけるコンクリートのひびわれ, コンクリートジャーナル, Vol. 11, No. 9, pp. 1~6, 1973
- (32) 吉岡保彦 : マスコンクリート構造物における水和熱による温度ひびわれ防止報に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1985
- (33) 木村克彦, 小野 定 : マスコンクリート構造物の温度ひびわれ発生の評価方法に関する研究, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp. 61~70, 1987
- (34) 土木学会 : 昭和61年制定コンクリート標準示方書 施工編, pp. 119~136, 1986

第2章 マスコンクリートの温度応力解析および温度ひびわれ予測、ならびに

温度応力のリラクセーション解析に関する研究の現状と問題点

2. 1 概説

マスコンクリートの温度応力ならびに温度ひびわれに関する研究は、20世紀初頭から注目され始め、それ以降現在に至るまで常にコンクリート工学における重要課題として多くの研究者の関心を引いてきた。温度応力に関連する研究は、極めて多岐に亘っており、これらの研究成果を集大成して初めて合理的な温度および温度応力解析、あるいは温度ひびわれ予測、さらには温度ひびわれ防止、制御対策の計画、実施が可能となる。現在までに、温度応力に係わる各分野において数多くの研究が行われ、多数の有用な知見も得られているが、温度応力に関連する諸研究が、それまでのダムコンクリートを対象とした温度応力についての基礎的検討に留まっていたものが、より一層の進歩を遂げたのは1950～1960年代以降であると考えられる。すなわち、弾性学のマスコンクリートの温度応力解析への適用が1950～1960年頃から本格化し、温度応力に対する理論的研究が注目をあびるようになった。さらにこの時期に、有限要素法などの数値解析手法がコンピュータの進歩、普及とともに工学各分野において大きな成果を上げ始め、ダムを始めとして、この時期に増大した他のマスコンクリート構造物の温度ならびに温度応力解析への応用も試みられるようになった。このように、1950～1960年代以降における解析手段の著しい進歩と、一方におけるマスコンクリートの多様化、高機能化などが相まって、温度応力ならびに温度ひびわれに関する研究が、新たな視点を加えて行われるようになった。そこで本節では、温度応力についての理論的研究が本格化した1950～1960年代以降における数多くの研究のうち、本論文に関係の深い分野、すなわち、マスコンクリートの温度解析、温度応力解析、温度応力のリラクセーション解析ならびに温度ひびわれの予測手法についての既往の研究成果を整理するとともに、これらの研究の現状と問題点を指摘して、本研究と従来の研究との関係ならびに本研究の位置づけを明確にする。

2. 2 温度応力解析

2. 2. 1 温度解析

(1) 温度物性

コンクリートの温度物性、すなわち、熱伝導率、熱拡散率、比熱、熱伝達率、および発熱量などは、セメント水和熱によるコンクリート打ち込み後の温度上昇を予測するために必要となるもので、ダムコンクリートの温度上昇と温度応力の研究が盛んとなり始めた1930年代から各方面で精力的に研究が行われるようになった。当時の研究の代表的なものとしては、Boulder (Hoover) ダムの建設にあたり米国開拓局で行われたものがあり、セメントコンクリートの温度物性に関する極めて広範囲な事項についての研究成果が報告されている⁽¹⁾。同報告には、セメントコンクリートの温度物性についての試験方法と試験結果および評価方法などが述べられており、現在でもしばしば関連の研究において引用されている。

さて、温度応力の理論的研究が本格化した1960年代以降も温度物性に関する研究は続けられたが、この頃からの研究は、主として試験方法および試験精度の改善あるいは温度物性の特徴についての検討など、従来よりさらに一歩進んだ形で研究が行われるようになった。以下に各項目について、比較的最近の研究成果をまとめて述べる。

(a) 熱伝導率、熱拡散率

普通コンクリートの熱伝導率は、 $1.19 \sim 3.13 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、また熱拡散率は $0.002 \sim 0.006 \text{ m}^2$ の範囲内にあるが、大部分が熱伝導率については $1.90 \sim 2.80 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、熱拡散率については $0.0030 \sim 0.0037 \text{ m}^2/\text{h}$ 程度の値をとる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。熱伝導率と熱拡散率は、含水率、骨材岩質、温度および配合などに影響を受ける。青柳らは、熱伝導率は骨材岩質と含水率に大きく影響をうけ、たとえば絶乾状態の熱伝導率は、飽水状態の33%減の値となる。一方、熱拡散率については、温度の影響も大きく、たとえば温度が 20°C から 100°C に増大すると、熱拡散率は30%程度減少する。また、骨材の岩質については、石英質骨材を用いると熱伝導率は大きくなり玄武岩あるいは Cabbros を用いると反対に小さくなることなどを報告している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。徳田らは、各種配合のコンクリートの熱伝導率、熱拡散率および比熱などの測定を行なった結果、熱伝導率と熱拡散率はそれぞれ $1.42 \sim 2.80 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ および $210 \times 10^{-5} \sim 443 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$ の範囲にあったことを報告している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。原田は、温度が 100°C 以下の場合、熱伝導率は実用上定数としてよいことを報告している⁽¹¹⁾。柳田は、広範囲にわたる実験をもとに、コンクリートの熱伝導率および熱拡散率に及ぼす配合の影響については、骨材の岩質および骨材量が支配的要因であり、水セメント比、セメントの種類などの影響は比較的小さいことを報告している⁽¹²⁾。

さて、熱伝導率は、供試体中に一定の温度勾配を与えた時の移動熱量から、一方、熱拡散率は、一定環境温度下での供試体の冷却曲線から測定することができるが、これらの具体的な測定法については、米国開拓局材料実験マニュアルに Neven 法および Glover 法が規定されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。またこの他にも、熱拡散率の測定方法として Thomson 法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾などが著名である。一方、熱伝導率と熱拡散率との間には次式が成立する⁽¹⁶⁾。

$$h^2 = \lambda / c \rho \quad (2-1)$$

ここに、 λ ：熱伝導率 (kcal/mh℃)

h^2 ：熱拡散率 (m²/h)

ρ ：密度 (kg/m³)

c ：比熱 (kcal/kg・℃)

徳田らは、多数の熱伝導率と熱拡散率の測定データをもとに、両者の間には次式が成立することを報告している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

$$h^2 = 0.0014 \cdot \lambda \quad (2-2)$$

上式を用いると、どちらか一方の定数から他の定数を推定することができる。また、複合材料工学的手法を用いてコンクリートをモデル化することにより、解析的に熱伝導率を推定する手法も報告されている⁽¹⁷⁾。

(b) 比熱

普通コンクリートの比熱は、常温では0.12～0.31kcal/kg℃の範囲内にあるが、大部分は0.20～0.28kcal/kg℃程度の値をとると考えてよい⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。比熱に影響をおよぼす因子としては、熱伝導率あるいは熱拡散率に対するものと同様のものが考えられるが、これらのうち支配的要因となるものは、温度と含水量である。すなわち、温度ならびに含水量が増大すると比熱は大きくなる傾向を示す。青柳らは、高強度コンクリートにおいて含水量が5.5%から11%に変化すると、比熱が20%増大することもあり、また、温度が20℃から100℃に変化すると、比熱は35%程度大きくなることを述べている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。徳田らは、温度が10℃上昇すると比熱の値は0.02kcal/kg℃程度大きくなることを報告している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。David らは、任意の含水量をもつコンクリートの比熱を、表乾状態におけるコンクリートの比熱から推定する方法を提案している⁽¹⁸⁾。

さて、コンクリートの比熱は、カロリーメーターにより測定することができるが、コンクリート構成要素の単純な複合則により、計算により決定することもできる⁽¹⁹⁾。あるいは、式(2-1)を用いると、熱伝導率、熱拡散率などから求めることも可能である。

(c) 発熱量

コンクリートの発熱量は、セメントの水和熱からこれを定める方法と、コンクリートの断熱温

度上昇特性から評価する方法がある。これらのうち、前者の方法について、野尻は各種セメントの水和熱量をもとにコンクリートの断熱状態および典型的な冷却状態におけるコンクリートの温度を計算する方法を示している⁽¹⁹⁾。また、有泉らあるいは Verbeck らは、コンクリートの水和熱をセメント中の水硬性化合物の含有量とそれらの発熱分担係数により定量的に表すことを試みている⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。長島あるいは Rustrup は、セメント水和熱発生過程を時間温度関数により表現することを試みている⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾。さらに、佐藤らはポルトランドセメントの水和熱評価式として、指数型の実験式を提案している⁽²⁵⁾。このように、セメントの水和熱を用いる方法は、試験方法も比較的容易で研究の蓄積もかなりあるが、セメント水和熱測定試験中においては試料温度が一定に保たれるため、実際のマスコンクリート中の、断熱に近い状態でのコンクリート発熱量とやや異なった発熱特性が得られる欠点がある。この点に関して、長滝らは、セメント水和熱から任意の打ち込み温度に対するコンクリートの断熱温度上昇特性を推定する方法を提案しているが⁽²⁶⁾、その研究は端緒を開いたばかりである。このような理由で、現在セメントの発熱量を評価する際にはほとんどの場合、後者の方法、すなわち断熱温度上昇特性が用いられる。この断熱温度上昇特性を用いると、実際のマスコンクリートに近い状態で発熱量を評価することができるという長所に加えて、発熱特性におよぼす各種要因の影響を比較的容易に考慮できるという利点もある。コンクリートの断熱温度上昇特性は、終局温度上昇量と発熱速度によって特徴づけられるが、これらに影響を及ぼす要因は数多くあり、中でもセメントの種類、セメント量、および打ち込み温度などが支配的となる⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。一般に、普通セメントの終局温度上昇量と発熱速度は、ともに高炉、フライアッシュ、中庸熱セメントなどにぐらべ大きくなる。また、単位セメント量が10kg/m³増加すると、終局温度上昇量は普通セメントで1.0℃程度上昇し、発熱速度も単位セメント量に比例した形で大きくなる。さらに、打ち込み温度が高くなると発熱速度は大きくなるが、終局温度上昇量は減少する傾向を示す。断熱温度上昇特性の評価式（断熱温度上昇式）は、各種提案されているが次の2式が代表的なものである。

$$T = k (1 - \exp(-\alpha t)) \quad (2-3a)$$

$$T = k (1 - \exp(-\alpha(t-t_a)^\beta)) \quad (2-3b)$$

ここで、 T ：断熱温度上昇量（℃）

t ：材令

k, α, t_a, β ：実験定数

塚山は、断熱温度上昇特性におよぼす各種要因の影響を明らかにした上で、断熱温度上昇式とし

て式(2-3a)を提案し、式中の定数 k 、 α の評価法を提示している⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾。柳田あるいは田沢らも、断熱温度上昇式として式(2-3a)を用い、定数 k 、 α を打設温度と単位セメント量の関数として与えている⁽¹²⁾⁽²⁸⁾⁽³¹⁾。平賀らは、既往の研究において採用された式(2-3a)中の定数 k 、 α の値のばらつきを、セメント銘柄、単位セメント量、および打ち込み温度それぞれについて明らかにしている⁽³²⁾。式(2-3b)の断熱温度上昇式は、式(2-3a)にくらべて実験値との適合も高く、遅延剤を用いた場合も良好に適合するとの報告もあるが⁽²⁹⁾⁽³³⁾、実用的には式(2-3a)でも十分な精度が得られることから、一般には式(2-3a)が採用される場合が多い。土木学会コンクリート標準示方書においてもコンクリート断熱温度上昇式として式(2-3a)を規定している。

さて、コンクリートの断熱温度上昇特性は、断熱温度上昇試験方法により求めることができるが、試験装置における温度の制御方法に関していくつかの方法が提案されている⁽⁶⁾⁽²⁷⁾。小野は、試験装置の相違が試験結果におよぼす影響を明らかにしている⁽³⁴⁾。また、佐藤らは、新型の試験装置によりコンクリートの断熱温度上昇特性を測定した結果、実験により得られた終局温度上昇量は、従来法による値、たとえば昭和61年制定のコンクリート標準示方書などにおける標準値より約2割程度大きくなったことなどを報告している⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾。

(d) 熱伝達率

コンクリート表面における熱伝達率は、主として風速、および養生条件により大きく変化するが、風速5m/s以下では8~16kcal/m²h℃の範囲にある。風速と熱伝達率の関係に関する代表的な研究としては、小沢の研究⁽³⁷⁾、山川らの研究⁽³⁸⁾、および小野の研究がある⁽³⁹⁾。小沢は、コンクリート表面からの熱伝達率は風速により変化するが、年平均風速を2.3m/sとすれば熱伝達率は12kcal/m²h℃程度となる。保温材のある場合は、保温材の種類により変化し、たとえば1cmの砂層に対しては10kcal/m²h℃、シートに対しては7kcal/m²h℃程度となることを報告している⁽³⁷⁾。山川は、熱伝達率測定試験機を製作し、これにより風速と熱伝達率の関係を求めている。それによると、風速が0m/sから5m/sへと変化するにともない、熱伝達率は10kcal/m²h℃から16kcal/m²h℃へとほぼ比例的に増加することを報告している⁽³⁸⁾。小野は、熱伝達率は風速には関係なく5~10kcal/m²h℃程度としておけば、温度解析において実用上十分な精度が得られることを報告している⁽³⁹⁾。このような研究成果を踏まえて、土木学会コンクリート標準示方書では、各種養生方法に対する熱伝達率の参考値を示している。

以上のように、コンクリートの温度物性に関しては、1930年代から今日まで各項目についてのかんりの研究の蓄積があり、温度解析を行う上で参考となる資料も多い。まず、コンクリート断熱温度上昇特性に関しては、その測定方法について検討課題もいくつか残されているが、公開されている資料も多く、通常の温度解析ではこれらを利用すればよいと考えられる。次に、熱伝達

率については、これを厳密に考慮することは極めて困難であるが、これについての実用的な評価法の提案もあり、現段階ではこれらの値を参考にすればよいであろう。最後に、熱伝導率、比熱、熱拡散率などのいわゆる熱流れ特性は、前述のように使用骨材その他により幅広く変化する。そのため、これらの測定法あるいは推定法についての提案も多いが、対象とするコンクリートについて、その都度これらの値について検討するのはあまり合理的ではなく、その前にまず、熱流れ特性が解析結果にどの程度影響を及ぼすかを全体的に把握しておくことが肝要であると考えられる。

(2) 温度解析手法

固体中の非定常熱伝導現象は、現象を支配する基礎方程式をある初期条件と境界条件のもとで解くことにより決定されるが、その基礎理論はほぼ確立されたものとなっている^{(16) (40)}。マスコンクリートの温度解析手法に関する本格的な研究は、Boulder Dam の建設に伴う総合的研究⁽¹⁾に始まり、現在に至るまで数多くの報文が発表されている。このうち、初期の研究は、Boulder Dam の方法など解析的および図解的な手法に関するものが主流であったが、これらの手法では境界条件が極めて限定されるなど大きな欠点をいくつか有していた。現在用いられているマスコンクリートの温度解析手法は大別して差分法系と有限要素法系とに分けられ、いずれも、いわゆる数値解法に分類されるものである。差分法系のものとしては、Schmidt の方法^{(41) (42)}、Carlson の方法^{(42) (43)}および有限差分法^{(42) (44)}などがある。これらのうち、有限差分法を除く各手法では、境界条件が十分に考慮できないなど適用上の制限はあるが、計算を簡単に進めることができるなどの利点を有しており、1次元の温度解析において現在でも広く用いられている。有限差分法は、熱伝導基礎方程式を差分近似により離散化し、基礎方程式を1次元連立方程式に帰着させるものである。この手法は、適用範囲も広く後述の有限要素法とならんで現在でも広く用いられているが、その適用性が有限要素法にくらべやや劣るため、適用される機会は少なくなりつつある。

さて、有限要素法系の解法には、有限要素法⁽⁴⁵⁾を初めとして、これと関連の深い境界要素法⁽⁴⁶⁾あるいは重みつき残差法⁽⁴⁷⁾などがある。このうち、有限要素法は、Visser が本手法の非定常熱伝導解析への適用例を示して以来⁽⁴⁸⁾、その適用性の広さから工学の各分野への普及が急速に進行した。一方、境界要素法、あるいは重みつき残差法に関しては、有限要素法にくらべいくつかの利点はあるものの、マスコンクリートの温度解析手法としての適用性についてはまだ十分に検討が行われていないのが現状である。

以上のことから、マスコンクリートの温度解析手法として、現在最も適当と考えられるのは有限要素法であり、コンピューター技術が進歩した現在、パソコンにより本手法を用いることも可能な段階にまで到達している⁽⁴⁹⁾。一方、簡便に1次元温度解析を行う場合は、Schmidt 法、あ

るいは Carlson 法なども有効であると考えられる。

2. 2. 2 温度応力解析

(1) 圧縮強度，弾性係数，ポアソン比および熱膨張係数

温度解析によりマスコンクリート各部のコンクリート打ち込み後の温度上昇が求まると、これをもとに温度応力を算定することが可能となる。弾性温度応力解析では、マスコンクリート各部の温度履歴の他に、コンクリートの弾性係数、ポアソン比および熱膨張係数が必要となる。また、圧縮強度は弾性係数など他の力学的性質との間には強い相関が存在するので、たとえば圧縮強度をもとに弾性係数を評価することも可能となる。この意味で圧縮強度も温度応力解析においても重要な性質となる。

さて、マスコンクリートの温度応力解析は、通常、材令初期から中、長期材令に至るまでの比較的長期間を対象として行われるため、この間におけるコンクリート諸物性の、材令の進行に伴う変化を適切に評価して解析を行う必要がある。この際、マスコンクリートにおいてはセメントの水和熱により部材がかなり高温となるため、諸物性の評価にあたっては材令に加えて温度の影響を加味した形、たとえば積算温度（温度×時間の総和）あるいは有効材令などの関数として評価するのが適切である。以下に各項目について、その評価法に関する既往の研究成果を述べる。

(a) 圧縮強度

マスコンクリートの温度応力解析において、圧縮強度は、弾性係数など他の力学的性質を推定する上で重要となるものである。コンクリート強度におよぼす養生温度の影響を検討した研究は、蒸気養生コンクリートあるいは寒中コンクリートの強度推定法に関して古くから報告されている。コンクリート強度の評価に積算温度の概念を導入した初期の研究に Nurse の報文がある^(5a)。積算温度（マチュリティ）は、一般的に次式で定義されるものである。

$$M = \int_0^{\tau} f(\theta_{(t)}) dt \quad (2-4)$$

ここに、 M：積算温度（マチュリティ）

θ ：養生温度

t：時間

τ ：材令

f(θ)：マチュリティ関数

Nurse は、マチュリティ関数として次式を提案している。

$$f(\theta) = k \cdot \theta \quad (2-5)$$

ここに、 k ：定数

θ ：温度

Nurse がコンクリートの強度評価に積算温度の概念を導入した後、いくつかのマチュリティ関数が各研究者により提案された。代表的なものとして、

$$f(\theta) = k \cdot (\theta + 10) \quad (2-6)$$

$$f(\theta) = k \cdot 2^{(\theta/10)} \quad (2-7)$$

などがある⁽⁵¹⁾。これらのうち、現在最も広く用いられているものが式(2-6)に示すマチュリティ関数で、次式により積算温度 M が算出される。

$$M = \sum (\theta + 10) \cdot \Delta t \quad (2-8)$$

また、CEB-FIPコードでは、積算温度にかえて次式の有効材令 t_e (日) を用いている。

$$t_e = M/30 = (\sum (\theta + 10) \cdot \Delta t) / 30 \quad (2-9)$$

さて、式(2-8)で与えられる積算温度と圧縮強度との関係については多数の研究が報告されており、たとえば Plowman は、次式のように圧縮強度を積算温度の対数 $\log_{10} M$ についての直線式で表すことを提案している⁽⁵²⁾。

$$f_c' = A + B \log_{10} M \quad (2-10)$$

ここに、 A, B ：実験定数

マスコンクリートを対象とした比較的最近の研究としては、岡田らの研究⁽⁵³⁾あるいは竹下らの研究⁽⁵⁴⁾がある。岡田らは、供試体に10～60℃の範囲内のマスコンクリートに近い温度履歴を与

え、圧縮強度、引張強度および弾性係数と積算温度 M ($^{\circ}\text{Chr}$) との関係を明らかにしている。それによると、各強度と弾性係数は $M=1000^{\circ}\text{Chr}$ を境にして、式 (2-10) と同型の2つの実験式で評価できることを報告している⁽⁵³⁾。竹下らは、マスコンクリートの諸物性の評価法に関する総合的な研究を行っている。圧縮強度の評価法に関しては、各種セメントを用いたコンクリートに対して $M=10000^{\circ}\text{Chr}$ の範囲内で、岡田らの提案式と同型の式 (2-10) を提案している⁽⁵⁴⁾。この他に、直接マスコンクリートを対象としたものではないが、圧縮強度と積算温度との関係を明らかにした研究としては、洪⁽⁵⁵⁾、笠井⁽⁵⁶⁾、Lew ら⁽⁵⁷⁾、向井ら⁽⁵⁸⁾、仕入⁽⁵⁹⁾あるいは大井⁽⁶⁰⁾などの各報文もあり、マスコンクリートの圧縮強度の推定法を検討する上で参考になるものと考えられる。

(b) 弾性係数

岡田ら⁽⁵³⁾、竹下ら⁽⁵⁴⁾、あるいは Lew ら⁽⁵⁷⁾は、弾性係数と積算温度との関係を直接的に実験より明らかにしている。岡田らは、マスコンクリートの弾性係数と積算温度との関係を、圧縮強度評価式と同型の式 (2-10) を用いて表している⁽⁵³⁾。Lew らも、弾性係数評価式として式 (2-10) と同型の実験式を用いている⁽⁵⁷⁾。竹下らは、マスコンクリートの弾性係数と積算温度との関係を実験により明らかにし、マスコンクリートでは若材令時の弾性係数の増加が顕著であることを指摘している。一方、弾性係数評価式として、次の指数型の実験式も提案している⁽⁵⁴⁾。

$$E_c = K \cdot \rho^{1.5} \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (2-11)$$

ここで、 K : 実験定数

ρ : 比重

σ_c : 積算温度で評価した圧縮強度

さて、式 (2-11) のように、弾性係数と圧縮強度との関係を定めておけば、積算温度から求めた圧縮強度をもとに積算温度を考慮した弾性係数の評価が可能となる。弾性係数と圧縮強度との関係を表す実験式は現在まで多数提案されているが、弾性係数を圧縮強度の指数式として与えるものが多い。代表的な提案式を図2-1に示す⁽⁶¹⁾。

(c) ポアソン比

コンクリートのポアソン比は通常0.15~0.20程度の値をとる。竹下らは、各種配合のマスコンクリートのポアソン比は0.12~0.20の範囲にあり、圧縮強度の増加にともない大きくなることを

明らかにし、ポアソン比と圧縮強度あるいはポアソン比と積算温度との関係式を与えている⁽⁵⁴⁾。マスコンクリートの温度応力解析においては、ポアソン比は一般の鉄筋コンクリートの設計で用いられる値0.2よりはやや小さい、0.16～0.18程度の値が採用されることが多い⁽⁶²⁾。

(d) 熱膨張係数

コンクリートの熱膨張係数は大略 $6\sim 13\times 10^{-6}$ の範囲にあり、骨材の岩質、骨材量、材令、配合および含水率などにより変化し、なかでも骨材の岩質の影響が最も大きい。すなわち、熱膨張係数の大きい骨材を用いるほどコンクリートのそれも大きくなる。骨材の膨張率について、青柳は、骨材自身のシリカ含有量にほぼ比例し、たとえばチャート、石英岩は大きく、石灰石は逆に小さな値をとることを述べている⁽⁷⁾。骨材の膨張係数の平均的範囲は $5.5\sim 11.8\times 10^{-6}$ 程度であると考えられるが、コンクリートの熱膨張係数は使用骨材のそれよりやや大きくなる。骨材以外の要因の影響については、多数の報文が報告されている。たとえば、Emanuel はコンクリートの熱膨張係数におよぼす各要因の影響を文献調査をもとに明らかにしている⁽⁶³⁾。それによると、コンクリートの熱膨張係数には骨材量と骨材岩質の他に、含水率、セメント量、温度変動のくりかえし、および材令などが影響し、このうち、含水率の影響については、一部乾燥供試体の熱膨張係数は飽水状態供試体の15%高になる。また、セメント量の増大に伴い熱膨張係数は増加し、温度変動のくりかえしと材令の進行に伴い熱膨張係数は減少することなどを報告している。竹下らは、極若材令における熱膨張係数はコンクリートの硬化前後で大きく変動し、硬化前で $20\sim 10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、硬化後で $10\sim 8.7\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であったことを報告している⁽⁵⁴⁾。熱膨張係数の温度依存性については、温度の増加にともない熱膨張係数はやや増大する傾向を示すが⁽⁶⁴⁾、実用上は温度の影響は無視してよいものと考えられる。このように、熱膨張係数は種々の要因により変化するが、主要因としては骨材岩質のみを考慮すればよいと考えられる。熱膨張係数を評価する場合、前述の熱流れ特性と同様、コンクリートの構成要素の熱膨張係数と構成比率をもとに単純な複合則により推定することも可能である⁽⁶⁵⁾。しかし、通常我国で用いられるコンクリートの熱膨張係数は平均的に $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 前後の値となり、従って温度応力解析で用いるコンクリートの熱膨張係数も、実用的には $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定してよいものと考えられる。

以上のように、弾性温度応力解析を行う際に必要となるコンクリートの諸物性のうち、ポアソン比と熱膨張係数は、一般的にはそれぞれ0.16～0.18および $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度の値を仮定してよいと考えられる。一方、弾性係数については、積算温度を考慮して直接的に、あるいは圧縮強度から推定するのが一般的となっているが、ただその前提として、マスコンクリートの温度応力解析において、コンクリートの物性評価に積算温度を用いることの意義を十分明らかにしておかなければならない。

(2) 温度応力厳密解析手法

温度応力など、いわゆる初期応力 (Initial Stress) の基礎理論は弾性学の分野ではすでに確立されたものとなっており、1930～1940年代にかけてダムコンクリートの温度応力解析においても、弾性学の理論を適用した解析の手法が種々検討された。たとえば、Brahtz は、重力ダム端部における収縮応力についての解析の手法を検討している⁽⁶⁶⁾。Smith は、同様の問題に対して、光弾性解析手法を適用している⁽⁶⁷⁾。この光弾性解析手法は、以後1960年ごろまでダムの温度応力問題に対する有力な解析手法として盛んに用いられ、これらの研究の成果は、現在においても外部拘束度評価の基礎資料として参考にされている。代表的な研究には次のものがある。川本は、基礎上に打継がれた矩形断面ブロックあるいは壁の収縮にともなう応力を、応力凍結法および接着法の光弾性解析を適用することにより明らかにしている⁽⁶⁸⁾。森は、温度応力の実用的光弾性解析手法を提案している⁽⁶⁹⁾。さらに、その手法を用いて拘束体上の三角形および矩形板などの被拘束体が様な温度変化を受ける場合、拘束体と被拘束体の形状、寸法および弾性係数が応力状態におよぼす影響を明らかにし、これをもとに拘束体を受ける拘束度の評価法を提案している⁽⁷⁰⁾。このような光弾性手法とならんで、一方ではエネルギー原理にもとづく手法など種々の解析手法も検討された。村らは、アーチの弾性基礎方程式を解析的に解くことにより、アーチダムに生じる温度応力を求めている⁽⁷¹⁾。川本らは、基礎上の矩形ブロックあるいは壁が温度変化などにより一様に収縮した時の応力を、光弾性法に加えて応力関数を用いた近似解析法を用いて明らかにしている⁽⁶⁸⁾。森は、岩盤などの基礎上に打ち継がれた壁体に生じる拘束応力とこれにおよぼす形状、寸法、および基礎と壁体の弾性係数の差などの影響を、光弾性解析法とポテンシャルエネルギー最小の原理による解析手法を用いて明らかにしている⁽⁷⁰⁾。

さて、1950年～1960年代にかけては、以上に述べた解析的および実験的手法に加えて、いくつかの数値解析法が検討されるようになった。Zienkiewicz は、岩盤上のマッシュなコンクリートブロックに生じる温度あるいは収縮応力を、弾性基礎方程式の差分表示式にリラクセーション手法を適用して明らかにしている⁽⁷²⁾。この差分表示式をリラクセーション手法により解く手法は、差分法に属するものであるが、差分法そのものの歴史はかなり古く、1900年代初頭には微分方程式の有力な数値解法としてすでに広く知られていた。ただ、差分表示式から得られる多元の連立1次方程式を精度よく解く手段が当時なかったので、Zienkiewicz によりリラクセーション手法の適用が報告されるまでは、工学上の実際的な問題に対する解析手法としては必ずしも実用的な手法とはならなかったのである。しかし、リラクセーション手法の開発、さらには、この後の電子計算機の出現により多元の連立方程式を精度よく解くことが可能となり、後述の有限要素法とならんで工学問題に対する有力な数値解法として注目されるようになる。さて、差分法とならんで、現在、工学問題の数値解析法として広く用いられているものに有限要素法がある。有限要素法は、変分法における Ritz 法を拡張したもので、その基本的概念は古くから確立されていた。

そして、1960年前後、Turner あるいは Clough が初めて工学上の実用的問題の解析に成功をおさめて⁽⁷³⁾⁽⁷⁴⁾から、有限要素法は、やはりこの頃に実用化された電子計算機の進歩と歩調を合わせて工学の諸問題に対する数値解析手法として急速に普及していく。マスコンクリートの温度応力に有限要素法を用いた先駆的な研究としては、Clough らの研究⁽⁷⁵⁾、Zienkiewicz らの研究⁽⁷⁶⁾、あるいは林らの研究⁽⁷⁷⁾がある。有限要素法は、マスコンクリートの温度応力解析のみならず工学各分野の諸問題に対する強かつ汎用性のある数値解析手法として、現在その地位を確固たるものとするに至っているのは周知の通りである。解析精度および適用性を考慮すると、マスコンクリートの温度応力の厳密解析手法として、現段階では本手法が最も有力であると考えられる。ただ、有限要素法で大規模な温度応力問題を解こうとすると大容量かつ高速の電子計算機の使用が不可欠となり、このため近年までは3次元温度応力解析を行った報告は極めて少ない現況にあった。しかし最近では、電子計算機の進歩により大規模3次元温度応力解析を行うことが比較的容易になりつつあることから、温度応力の解析精度を高め、その発生メカニズムを究明するためにも、より実状を反映した形で解析が可能な3次元解析を、今後積極的に導入していく必要があるものと考えられる。これに関連して、有限要素法に比べ計算規模の大幅な縮小が可能な有限プリズム法、あるいは境界要素法などの温度応力解析への導入が田辺ら⁽⁷⁸⁾および椿ら⁽⁷⁹⁾により試みられているが、今後の一つの方向性を示すものとして注目される。

(3) 温度応力簡易解析手法

温度応力の簡易解析手法は1930～1940年代、ダムコンクリートの温度応力の研究が本格化した当時より、実用的観点から種々検討された。たとえば、Carlson は、温度応力の発生機構を内部拘束と外部拘束の2つの観点から明らかにし、それぞれの応力、すなわち内部拘束応力と外部拘束応力の評価手法を提案している⁽⁸⁰⁾。このように、温度応力を内部拘束応力と外部拘束応力とに分けてそれぞれを別々に算出する考え方は、基本的には現在でも変わることがなく、今までに提案された簡易解析法は全て同様の考え方に立つものである。以下に、現在までに提案された内部拘束応力と外部拘束応力の簡易算出法のうち、主なものについて述べる。

(a) 内部拘束応力

内部拘束応力は、コンクリート内部の温度ひずみ分布が弾性学でいう、ひずみの適合条件式を満足しない時に発生する応力であり、平面ひずみ場では、図2-2の矩形ブロックに生ずる内部拘束応力は次式で与えられている⁽⁸¹⁾。

$$\sigma_x = \sigma_z = -\frac{\alpha T E}{1-\nu} + \frac{1}{2c(1-\nu)} \int_{-c}^{+c} \alpha T E dy + \frac{3y}{2c^3(1-\nu)} \int_{-c}^{+c} \alpha T E y dy \quad (2-12)$$

上式において、部材内の温度分布 T を中心軸に対して対象な放物線を仮定すれば、部材表面と内部の温度応力は次式で与えられる。

$$\sigma_i = \frac{2}{3} \alpha E \Delta T_i \quad (\text{表面}) \quad (2-13)$$

$$\sigma_i = -\frac{1}{3} \alpha E \Delta T_i \quad (\text{中心}) \quad (2-14)$$

ここで、 ΔT_i ：部材中心と表面の温度差

α ：熱膨張率

E ：弾性係数

式(2-13)と(2-14)は、内部拘束応力の簡易算定式として広く用いられているが、小野は、種々の観測データから定めた部材内部の温度分布 T を用いて、次式のような表面の内部拘束応力算定式を提案している⁽⁸²⁾。

$$\sigma_i = \frac{3}{8} \cdot \frac{\alpha E}{(1-\nu)} \Delta T_i \quad (2-15)$$

ここで、 ν ：ポアソン比

式(2-13)～(2-15)に示した内部拘束応力は、部材内部の温度分布曲線より図解的に求めることもできる。この手法は、Compensation Line 法（以下、本論文ではCL法とする）と呼ばれておりその具体的方法は、Carlson⁽⁸⁰⁾あるいは小沢ら⁽³⁷⁾によって紹介されている。また、最近では弾性係数 E の時間的变化を考慮するため、次式のように各時間増分区間における応力増分を累計する、いわゆる増分解法が採用されることが多い⁽⁸³⁾。

$$\sigma_i(t) = \sum_{k=1}^n \Delta \sigma_{ik} \quad (2-16)$$

ここで、 $\sigma_i(t)$ ：時間 t での内部拘束応力

$\Delta \sigma_{ik}$ ：各時間増分区間における内部拘束応力増分

(b) 外部拘束応力

外部拘束応力は、部材の自由な温度変形が岩盤あるいは旧コンクリートなどの外部要因により拘束を受けるために生じる応力である。部材の温度変形としては、軸方向の伸縮（軸方向変形）と部材のそり・たわみ（曲げ変形）の2つが考えられるが、従来から用いられてきた簡易算定法においては、軸方向変形の拘束だけが考慮されており、その基本式は次のようである。

$$\sigma_r = R E \alpha \Delta T_r \quad (2-17)$$

ここで、 σ_r ：外部拘束応力

R ：外部拘束度

E ：弾性係数

α ：熱膨張係数

ΔT_r ：温度変化量

上式中の外部拘束度 R ならびに温度変化量 ΔT_r などに関して現在までに、種々の算定式が提案されているが、代表的なものは次の通りである。

1) ダムで用いられる一般式⁽⁸⁴⁾

$$\sigma_r = R \alpha [T_1 E_1 + (T_1 - T_2) E_2] \quad (2-18)$$

ここで、 R ：外部拘束係数で、既往の研究成果を参考にする。

T_1 ：部材1カ月までのコンクリート最高温度

T_2 ：最終安定温度

E_1 ：材令1ヶ月までの平均弾性係数

E_2 ：材令1ヶ月以降、最終安定温度に達するまでの平均弾性係数

α ：熱膨張係数

2) 小野らの方法⁽³⁵⁾

$$\sigma_r = R \alpha E_e (T_p + T_{m \cdot r \cdot max} - T_{m^t}) \quad (2-19)$$

ここで、 T_p ：コンクリート打ち込み温度
 E_e ：有効弾性係数
 $T_{m \cdot r \cdot max}$ ：部材平均温度上昇量の最大値
 R および T_{m^t} ：短，中，長期における拘束度ならびに部材平均温度

3) 塚山の方法⁽⁸⁶⁾

$$\sigma_r = R \alpha E_e T_m \quad (2-20)$$

ここで、 R ：拘束度
 E_e ：クリープを考慮した弾性係数
 T_m ：部材平均温度上昇量で最高温度上昇量の0.78倍とする。

式(2-18)～(2-20)の各提案式の他に、吉岡は、外部拘束を受ける部材をバネによる一軸拘束モデル系に置換し、モデル化された系についての変形の適合条件および力のつりあい条件から、部材に生じる外部および内部拘束応力を算定する解析手法を提案している⁽⁸⁷⁾。吉岡の方法は増分解析法であるが、他の簡易算定式を用いる場合でも、前述の内部拘束応力と同様、最近では増分解析法が多く用いられる。これまでに述べた各手法は、温度変形のうちの軸方向変形の拘束のみを考慮したものであるが、前述のように、温度変形には軸方向変形に加えて曲げ変形が含まれる。この曲げ変形の拘束をも考慮した解析手法に、JCIマスコンクリートの温度応力研究委員会が提案したCP(CL法)法がある⁽⁸⁸⁾。本手法については、本論文第6章において詳述するのでここでの説明は控えるが、本手法は土木学会コンクリート標準示方書において温度応力の解析手法として推奨されており、今後の発展が期待される。

さて、いずれの簡易解析手法を用いる場合でも、重要となるのは拘束度およびクリープを考慮した弾性係数の評価である。このうち、クリープを考慮した弾性係数の評価に関しては、後述の温度応力のリラクセーション解析に対する簡易解析手法の項で述べることにし、以下では外部拘束度に関する既往の研究成果を概観する。

ACI 207委員会報告では、Zangerらの研究など、これまでに行われてきたダムについての外部拘束に関する諸研究を参考にして、底面で拘束される矩形壁における高さ方向の拘束度分

布を、壁の長さ（L）と高さ（H）の比（L／H）をパラメータとして与えている⁽⁸⁹⁾。そして、拘束体と被拘束体の剛性比の影響は、次式で求まる係数を乗ずることにより考慮している。

$$M = 1 / (1 + A_1 E_1 / A_2 E_2) \quad (2-21)$$

ここで、 A_1, A_2 ：被拘束体ならびに拘束体の断面積
 E_1, E_2 ：被拘束体ならびに拘束体の弾性係数

このACI 207委員会提案の外部拘束度は、現在でも各種の簡易解析法において参考にされている。森は、半無限基礎上の矩形板ならびに同幅の基礎上の矩形板に対する拘束度として、それぞれ次式を用いることを提案している⁽⁷⁰⁾。

$$R = 1 / (1 + 0.4k) \quad (2-22)$$

および

$$R = 1 / (1 + k^{0.7}) \quad (2-23)$$

ここで、 R ：拘束度
 E_1, E_2 ：矩形板ならびに基礎の弾性係数
 k ：弾性係数比 E_1 / E_2

吉岡は、有限要素法を用いて外部拘束度に及ぼす被拘束体と拘束体との弾性係数比ならびに被拘束体の高さ（H）と長さ（L）の比（H／L）の影響を明らかにし、半無限地盤上の矩形ブロックおよび矩形ブロックと同幅の拘束体が存在するときの最大拘束度をそれぞれ次式で与えている⁽⁹⁰⁾。

$$R = 1 / (1 + 3k \cdot (H / L)) \quad (2-24)$$

および、

$$R = 1 / (1 + 6.7k \cdot (H / L)) \quad (2-25)$$

ここで、 R ：最大拘束度

k：被拘束体と拘束体の弾性係数比

永山らも、外部拘束度を弾性係数比ならびに被拘束体の H/L をパラメータとしたチャートの形で与えている⁽⁹¹⁾。小野は、有限要素法を用いて外部拘束度に及ぼす被拘束体の H/L と弾性係数比の影響を明らかにするとともに、前述の森の外部拘束度評価式の適用性などを明らかにしている⁽⁹²⁾。関島らは、抗の拘束度は0.1以下と非常に小さくなることを数値計算により明らかにしている⁽⁹³⁾。JCIマスコンクリートの温度応力研究委員会は、CP法（CL法）法の提案に関連して、被拘束体には軸方向変形拘束の他に曲げ変形拘束が存在することを指摘し、それぞれに対する拘束度係数を被拘束体の L/H ならびに被拘束体と拘束体の弾性係数比をパラメータとして与えている⁽⁸⁸⁾。このように外部拘束度については、温度応力解析手法の進歩により次第に明らかにされつつあり、最近では打ち継ぎ部における剥離、あるいはすべりと外部拘束効果との関連を述べた理論的および実験的研究も報告されている⁽⁹⁴⁾。

以上のように、温度応力の簡易解析手法については現在まで数多くの手法が提案されており、必要に応じて適切なものを参考にすればよいと考えられるが、現段階ではCP法（CL法）が解析精度および適用性などの面で比較的すぐれていると考えられる。しかし、CP法を含めて、各解析手法にはそれぞれ適用可能な範囲が存在し、これらを用いる場合には、その適用性の限界を十分把握しておくことが肝要である。また、前述の外部拘束度についても、比較的単純な拘束系についてしか明らかにされておらず、さらに種々の例についての外部拘束度の解明が必要である。

2.3 温度ひびわれ予測

温度ひびわれの予測を行う際、温度ひびわれの発生メカニズム、あるいはひびわれ発生条件を明確にしておく必要がある。温度ひびわれ発生メカニズムに関しては、大別して現在次の2つの考え方があ

- (1) 温度応力が引張強度を上回ると温度ひびわれが発生する。
- (2) 拘束された温度ひずみが引張ひずみ能力を上回った時に温度ひびわれが発生する。

現在までに提案されている温度ひびわれの予測手法は、温度ひびわれの発生条件として上記のいずれかを採用しながらも、温度応力解析手法、温度ひびわれの危険度を表す指数の定義法あるいは温度ひびわれの危険度の評価法などにおいてそれぞれいくつかの相違点がある。本節では、温度ひびわれ予測手法を温度応力解析にもとづく予測手法と、温度応力解析によらず部材の形状、寸法、あるいはその他の施工要因から予測する手法の2つに大別し、各々について主なものを概観する。

2. 3. 1 温度応力解析にもとづく予測手法

(1) 引張強度と引張ひずみ能力

温度応力解析から得られる温度応力、あるいは拘束された温度ひずみをもとに温度ひびわれの危険度を評価する際、コンクリートの引張強度あるいは引張ひずみ能力を算定する必要がある。

(a) 引張強度

マスコンクリートの引張強度を評価する場合、圧縮強度あるいは弾性係数などと同様、一般的に積算温度（マチュリティ）が用いられる。その際、引張強度を圧縮強度から推定する方法と直接マチュリティから算出する方法とがある。前者においては、現在までに数多くの実験式が提案されているが、指数式を採用したものが多い。次に主な提案式を示す⁽⁹⁵⁾⁽⁹⁶⁾。

$$f_t = 2.66 f_c'^{1.44} \quad (2-26)$$

$$f_t = 0.221 f_c'^{0.84} \quad (2-27)$$

$$f_t = 0.5 f_c'^{2/3} \quad (2-28)$$

$$f_t = 0.396 f_c'^{0.73} \quad (2-29)$$

ここで、 f_t ：引張強度 (kgf/cm²)

f_c' ：圧縮強度 (kgf/cm²)

次に、積算温度の関数として直接引張温度を与える実験式としては、岡田ら、あるいは竹下らの提案式がある。岡田らは、マスコンクリートの引張強度とマチュリティの関係式として次式を提案している⁽⁵³⁾。

$$f_t = 49 \log_{10} M - 130 \quad (M \leq 1000^\circ\text{Chrの場合}) \quad (2-30)$$

$$f_t = 17 \log_{10} M - 35 \quad (M > 1000^\circ\text{Chrの場合}) \quad (2-31)$$

ただし、 M ：マチュリティ (°Chr)

竹下らも、各種配合のコンクリートに、マスコンクリートに近い温度履歴を与えた場合、引張強度とマチュリティの関係は、岡田らの提案式と同様の対数式で表されることを報告している。さらに、脆度係数と圧縮強度との間には次のような直線関係が成立することを報告している⁽⁵⁴⁾。

$$f_{ct}' / f_{ct} = 0.007 f_{cc}' + 8.0 \quad (\text{川砂利、川砂使用}) \quad (2-32)$$

および

$$f_{ct}' / f_{ct} = 0.005 f_{cc}' + 8.0 \quad (\text{碎石、砕砂使用}) \quad (2-33)$$

(b) 引張ひずみ能力

コンクリートの引張ひずみ能力については、乾燥収縮ひびわれに関連していくつかの研究が報告されている。大島らは、普通セメント使用の高強度コンクリートの収縮限界値として 3.65×10^{-4} を提案している⁽⁹⁷⁾。狩野らは、コンクリートの伸び能力を弾性ひずみとクリープひずみの和と考え、普通コンクリートの伸び能力として $4 \sim 4.5 \times 10^{-4}$ の値を与えている⁽⁹⁸⁾。大野も、コンクリートの伸び能力を弾性ひずみとクリープひずみの和とし、その値として 4×10^{-4} を与えている⁽⁹⁹⁾。マスコンクリートの温度ひびわれに関連したコンクリートのひずみ能力については、Houk ら⁽¹⁰⁰⁾、Houghton⁽¹⁰¹⁾あるいは、Liu ら⁽¹⁰²⁾の研究がある。Houk らは、 $15 \times 15 \times 53\text{cm}$ と $30 \times 30 \times 106\text{cm}$ の角柱供試体を用いて載荷期間7～71日および7～114日の緩速載荷曲げ試験を行なった結果、コンクリート引張伸び能力は $170 \sim 255 \times 10^{-6}$ であったことを報告している⁽¹⁰⁰⁾。Houghton は、Houk らの研究と同様の緩速載荷曲げ試験をもとに、材令90日における引張ひずみ能力の算定式として次式を与えている⁽¹⁰¹⁾。

$$S_{90} = \frac{f_{90}}{E_{90}} + \frac{(f_7 + f_{90})}{2} \cdot C_{7-90} \quad (2-34)$$

ここで、 S_{90} ：材令90日における引張ひずみ能力

f_{90} ：材令90日における曲げ強度 (kgf/cm²)

f_7 ：材令7日における曲げ強度 (kgf/cm²)

C_{7-90} ：材令7日から90日までの単位クリープ

上式も、引張ひずみ能力を弾性ひずみとクリープひずみの和と考えて導き出されたものである。

Liu らは、緩速載荷時の引張ひずみ能力算定式として次式を提案している⁽¹⁰²⁾。

$$\varepsilon_s = \psi \varepsilon_R \quad (2-35)$$

ただし、 ε_s ：緩速載荷時の引張ひずみ能力
 ψ ：引張ひずみ能力比（＞1.0）
 ε_R ：通常載荷時の引張ひずみ能力

上式において、 ε_R および ψ の評価式として次式を与えている。

$$\varepsilon_R = k \frac{0.62 [f_c']^{0.77}}{E} \quad (2-36)$$

$$\psi = 410 k \frac{[f_c']^{1.85}}{E^2} \quad (2-37)$$

ここで、 E ：圧縮弾性係数（kgf/cm²）
 f_c' ：圧縮強度（kgf/cm²）
 k ：骨材係数

以上のように、マスコンクリートの引張強度ならびに引張ひずみ能力評価法のうち、引張強度についてはかなりの数の提案式もあり、温度ひびわれ危険度評価にあたっては実状にあったものを採用すればよいと考えられ、また測定も比較的容易である。一方、引張ひずみ能力に関しては引張強度にくらべてかなり少ないのが現状であるが、ひずみによる温度ひびわれ評価手法を検討する上で不可欠な性質であることから、今後精力的に取り組むべき課題である。

（２）温度応力解析にもとづく温度ひびわれ危険度評価

従来から一般的に、温度応力が引張強度を上回った時、あるいは拘束引張ひずみが引張ひずみ能力を上回った時に温度ひびわれが発生すると考えて、温度応力解析をもとに種々の温度ひびわれ対策が検討されてきた。Carlson らは、温度応力解析手法として Raphael などが提唱した "Step method"⁽¹⁰³⁾を用い、温度ひびわれ防止対策としての表面冷却養生法の効果を検討している⁽¹⁰⁴⁾。原口らは、有限要素法を用いた重力ダムの温度応力解析をもとに、ダムかさ上げ時におけるダム上流部のひびわれ制御対策を検討している⁽¹⁰⁵⁾。塚山は、温度応力簡易解析をもとにして、壁体における温度ひびわれ発生条件を壁厚および拘束度の関数として与えている⁽⁸⁶⁾。永山らは、コンクリートダムにおけるプレクーリングあるいはパイプクーリングなどの温度ひびわれ対策工の効果を、有限要素法による温度応力解析により検討している⁽⁹¹⁾。辻ら⁽¹⁰⁶⁾あるいは井村ら⁽¹⁰⁷⁾は、膨張コンクリートの壁体の温度ひびわれ制御効果を、実大模型実験あるいは温度

応力簡易解析により検討をしている。J C I マスコンクリートの温度応力研究委員会は、C P 法を用いた温度応力解析をもとに、マットスラブおよび壁状構造物における各種温度ひびわれ制御対策の効果を示している⁽¹⁰⁸⁾。

以上の諸研究では、いずれもが温度ひびわれ発生条件として温度応力と引張強度によるものを念頭においている。ひびわれ発生条件として拘束ひずみと引張ひずみ能力を用いたものとしては、乾燥収縮ひびわれに関しては研究の蓄積も多い⁽¹⁰⁹⁾。しかし、温度ひびわれについては極めて数が少なく、野中が、構造物に $50 \sim 300 \times 10^{-6}$ ほどのひずみが生ずればひびわれの危険有りとなししてよいと報告している⁽¹¹⁰⁾ほか、コンクリート標準示方書に規定された温度ひびわれ指数の簡易算定式が、コンクリートの限界ひずみと拘束ひずみとの比から導き出されている程度で、現在までに温度応力解析にもとずいた形で、具体的に拘束ひずみと引張ひずみ能力を用いて温度ひびわれの危険度の評価を行った研究はほとんど皆無である。RILEM の報告⁽⁵¹⁾あるいは、Carlson らの報文⁽¹¹¹⁾に、ひずみにもとずく温度ひびわれなどの発生メカニズムの説明がなされているが、マスコンクリートを対象とした引張ひずみ能力の評価法の研究が十分でないなどの原因により、これを用いての具体的な温度ひびわれ予測に関する研究が行われないまま現在に至っているのが現状である。

さて、ひびわれ予測を行う場合、応力と強度にもとずく予測であれ、ひずみとひずみ能力による予測であれ、いずれの場合でも温度ひびわれ発生に対して確定論的な判断が行われてきた。これに対して、吉岡は引張強度と温度応力の比により温度ひびわれ安全度を定義し、各種の施工データからひびわれ安全度とひびわれ発生確率の関係を統計解析により求め、マスコンクリートのひびわれ評価において、ひびわれ発生確率の考え方を導入しうることを示している⁽¹¹²⁾。木村らも、増分形式の温度応力簡易算定式から温度応力を算出し、これと引張強度により定義した温度ひびわれ指数に対する温度ひびわれ発生確率の関係を検討している⁽¹¹³⁾。さらに、土木学会コンクリート標準示方書においても、引張強度と温度応力との比により温度ひびわれ指数を定義し、指数の値によりひびわれ発生の危険性を確率的に評価することを規定している。吉岡あるいは木村らの研究は、従来からの確定論的な温度ひびわれ危険度評価手法を一步進め、確率論的温度ひびわれ予測手法を具体的に提示した点において重要な意味をもつものであるが、ここで用いられている温度応力解析手法は、簡易解析法に属するもので、その適用性に限界があると考えられる。従って、有限要素法など適用性の高い解析手法による、さらに広範囲の構造物を対象とした温度ひびわれ危険度評価の確率論的検討ならびに資料の蓄積が今後ぜひとも必要である。

2. 3. 2 その他の予測手法

温度応力あるいは拘束ひずみなどを直接用いずに温度ひびわれ危険度評価を行う方法として、

古くからダムで行われてきた温度上昇および降下速度を目安とする方法がある⁽¹¹⁴⁾。一方、塚山は壁体における温度ひびわれ発生限界となる中心部の最高温度上昇を次式で与えている⁽⁸⁶⁾。

$$T_{cr} = \frac{12}{0.1 + 0.25\sqrt{W} + 0.8k} \quad (2-38)$$

ここで、 T_{cr} ：ひびわれ発生限界となる最高温度上昇（℃）

W ：壁厚（cm）

k ：外部拘束度

塚山の方法にみられるように、温度ひびわれに影響を及ぼす要因としては温度上昇量の他に構造物の形状、拘束度さらにはコンクリートの力学的性質など数多くのものが考えられるが、小野は、これらの要因を用いて内部拘束による温度ひびわれ指数と外部拘束による温度ひびわれ指数を定義し、各指数と温度ひびわれ発生確率との関係を提示している⁽¹¹⁵⁾。また、桑原は円盤状の供試体を用いた温度ひびわれ実験をもとに、供試体中の温度分布から定義した温度分布係数によりひびわれ発生の危険度の大小を評価できることを示している⁽¹¹⁶⁾。山崎は、拘束度 R と温度降下量 ΔT を用いて、ひびわれ条件式として次式を与えている⁽¹¹⁷⁾。

$$\Delta T \cdot R = 10 \quad (2-39)$$

以上、温度応力あるいは拘束ひずみを直接用いず、温度上昇およびその他の施工要因から温度ひびわれの危険度を評価する手法をいくつか述べたが、これらの手法では温度応力解析が必ずしも必要でないためその実用性は高いと考えられるが、反面、構造物における温度ひびわれ危険度の位置的および時間的变化ならびに温度ひびわれに影響をおよぼす諸条件について十分に検討ができないなどの難点がある。

2. 4 温度応力のクリープならびにリラクセーション解析

温度ひびわれの予測手法、あるいは温度ひびわれ防止および制御技術の向上を計るためには、これらの基礎となる温度応力解析手法の確立が不可欠の要素となる。周知のように、温度応力はコンクリートのクリープあるいはリラクセーションの影響を大きく受けるため、解析においてはこれらを適切に考慮する必要がある。本節では、温度応力のリラクセーション解析に必要な、主として若材令時におけるコンクリートのクリープならびにリラクセーション特性と、これらを用

いた温度応力のリラクセーション解析あるいはクリープ解析に関する既往の研究成果を概観する。

2. 4. 1 リラクセーション特性

コンクリートのリラクセーション特性に関する既往の報文は、クリープに関するものに比べて比較的数字が少ない。Hanson は、材令28日（圧縮強度約360kgf/cm²）と材令90日（圧縮強度約370kgf/cm²）の各材令において、強度の8%の圧縮応力を導入した場合のリラクセーション特性について、材令300日における緩和量は14.7kgf/cm²（対導入応力比50%）および11.4kgf/cm²（対導入応力比39%）であったことを報告している^{（118）}。Ross は、材令7～10日（推定圧縮強度約480kgf/cm²）において、強度の30%および22%の応力を導入した場合のリラクセーション特性について、材令140日の緩和量は、前者で75kgf/cm²（対導入応力比51%）、後者においては57kgf/cm²（対導入応力比54%）であったことを報告している^{（119）}。Chang らは、材令45日（圧縮強度357kgf/cm²）、同100日（圧縮強度250kgf/cm²）および同217日（圧縮強度287kgf/cm²）の3種類の供試体で、導入応力を各々の圧縮強度の67%、82%および58%とした場合の緩和量は、それぞれ8日経過後90kgf/cm²（対導入応力比37%）、82日経過後92kgf/cm²（対導入応力比45%）および35日経過後82kgf/cm²（対導入応力比49%）であったことを報告している^{（120）}。以上の各研究に対し、Taylor らは、従来のリラクセーション試験に於ては供試体ひずみの拘束方法に問題があったことを指摘し、電子負荷制御付油圧試験機を用いて圧縮リラクセーション特性におよぼす導入応力レベル、湿度条件、コンクリート強度および再負荷などの影響を検討している。試験材令は大部分が42日となっている。試験の結果、載荷応力レベルが高くなればリラクセーションも大きくなる、湿度が乾湿いずれの方向であれ変化する場合には緩和速度が大きくなる、強度の影響は明確ではない、Ross の提案したクリープ実験式がリラクセーション関数として適用できることなどを明らかにしている^{（121）}。西林らは、普通ならびに軽量コンクリートの破壊前後の高応力、高ひずみ下での圧縮緩和現象を明らかにしている。試験材令は約1年で、載荷実験はひずみ負荷制御装置付剛性試験機を用いている。実験の結果、リラクセーション関数としてRossの式と類似の双曲線型の実験式を用いることができる、緩和量が終局緩和量の1/2となる時間は6分前後である、終局緩和量はコンクリートの種類による変化は少なく導入応力レベルに比例し、比例定数は強度破壊点までは7～8%でそれ以降は13～15%となることなどを報告している^{（122）}。木山らは、材令3ヶ月の普通ならびに軽量コンクリートの引張りリラクセーションを明らかにしている。導入応力は、引張強度の30～90%としている。実験の結果、引張りリラクセーション関数として著者らがすでに提案した圧縮下のリラクセーション関数と同型の実験式を用いることができる、1/2 緩和時間は0.4～1.8分となり引張緩和現象は極めて短期終結性である、終局緩和量は圧縮下の特性と同様、導入応力レベルに比例するが、その比例定数は0.03～0.06で圧縮

緩和の約半分となることなどを報告している⁽¹²³⁾。野中は、若材令コンクリートの引張りラクセーション特性におよぼす載荷材令と養生方法の影響について検討を行っている。載荷材令は5, 8, 11日の3材令、養生方法は水中と気中の2種類とし、載荷応力は引張強度の40%としている。結論として、西林、木山式⁽¹²²⁾⁽¹²³⁾が若材令コンクリートの引張りラクセーション関数として適用可能である、1/2 緩和時間は水中養生で4~9時間、気中養生では3~6時間となる、終局緩和量は概略70%以下となることなどを報告している⁽¹²⁴⁾。野中の研究は温度応力のリラクセーション解析を念頭において行われたものであり、若材令時の特性を対象としている点では注目に値するが、供試体ひずみの制御法にやや問題があり、そのため実験により得られた結果のばらつきは極めて大きく、引張りラクセーション特性に及ぼす載荷材令などの影響は必ずしも明らかになっていない。また、載荷材令の影響も考慮した引張りラクセーション特性評価式の提案までには至っていない。

以上のように、コンクリートのリラクセーション特性、特に温度応力のリラクセーション解析で重要となる若材令時における特性についてはほとんど明らかにされていないのが現状である。コンクリートのリラクセーション特性を用いて温度応力のリラクセーション解析を行うためには、リラクセーション特性の合理的評価法を確立することが必要となる。リラクセーション特性を用いた温度応力のリラクセーション解析手法は、本論文第5章で詳述するようにいくつかのすぐれた特徴を持っており、コンクリートのリラクセーション特性の解明は早急に検討すべき重要な課題である。

2. 4. 2 クリープ特性

ダムコンクリートのクリープについては、1930年代から米国内務省開拓局などにおいて系統的な実験が解始され、以後1960年代まで精力的に研究が続けられた。これらの研究においては、ダムでのひずみ実測値から応力を推定することを主目的とし、主にクリープの数学的表現法、クリープ試験法、さらにはクリープにおよぼす供試体寸法効果、あるいは温度と湿度の影響などについて検討が行われた。代表的な研究としては、米国開拓局の一連の研究⁽¹¹⁸⁾⁽¹²⁵⁾をはじめとして、Polivka らあるいは君島の総合的な研究⁽¹²⁶⁾⁽¹²⁷⁾⁽¹²⁸⁾がある。

さて、1960~1970年にかけて有限要素法の導入により温度応力解析手法が飛躍的に進歩し、解析においてクリープの影響を厳密に考慮することが可能となった。これに伴いダムコンクリートなどマスコンクリートのクリープに関する研究の重要性が再び高まり、温度応力のクリープ解析において特に重要となる載荷材令、あるいは温度の影響に着眼したより詳細な研究が行われるようになった。原口らは、クリープ関数として次の対数関数を提案している。そして、3種の配合の、載荷材令1, 3, 7, 28および91日における式中の定数B(クリープ定数)の値を温度

の関数として与えている⁽¹²⁹⁾。

$$\varepsilon_c = B \cdot \sigma_t \cdot \ln(t+1) \quad (2-40)$$

ここで、 ε_c ：クリープひずみ
 σ_t ：応力
 t ：載荷時間

CEB-FIPコードでは、クリープ係数を初期急速変形、遅延弾性ひずみおよび流動の3成分の和として与え、各成分の評価にあたっては載荷時有効材令、部材の寸法および温度などを考慮することとしている⁽¹³⁰⁾。CEB-FIPコード提案式は、温度応力のクリープ解析への導入も比較的容易であることから、これを採用した報告例は比較的多い⁽¹³¹⁾。岩城らは、マスコンクリートに近い温度履歴を供試体に与える一方、温度上昇期では圧縮クリープ試験、温度降下期では引張クリープ試験を行い、次のようなクリープ係数評価式を得ている⁽¹³²⁾。

$$\varphi(t_e) = 3.9 (1 - e^{-0.17 t_e}) \quad (2-41)$$

ここで、 $\varphi(t_e)$ ：クリープ係数
 t_e ：有効材令(θ)

大崎らは、マスコンクリートの温度応力のクリープ解析手法として状態方程式法を用いることとし、その際の相当クリープひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ として次式を用いることを提案している⁽¹³³⁾。

$$\dot{\varepsilon} = \xi(\tau) \phi(T) \dot{J}(t) \sigma \quad (2-42)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}$ ：相当クリープひずみ
 $\xi(\tau)$ ：載荷材令係数
 $\phi(T)$ ：温度関数
 $\dot{J}(t)$ ：クリープ関数
 τ ：材令
 t ：時間
 T ：温度

この他、温度応力のクリープ解析に導入可能な提案式としては、ACI 提案式⁽¹³⁴⁾あるいは Bazant らの提案式⁽¹³⁵⁾などがある。

以上のように、温度応力のクリープ解析に適用可能なクリープ評価式としては、CEB-FIP 式を始めとしていくつかを上げることができるが、マスコンクリートを念頭においたクリープ評価式は、岩城らの提案式の他に 1, 2 を数える程度であり、汎用性の高い評価式確立のため今後さらに多くの資料の蓄積が必要である。

2. 4. 3 クリープならびにリラクセーション厳密解析手法

温度応力に対するクリープおよびリラクセーションの影響は、温度応力の研究が本格化した 1930 年代からすでに認識されており、興味ある報文も散見される。以下に当時から現在に至るまでの研究の流れを概観する。

Blanks らは、一軸拘束試験により温度応力のシミュレーション実験を実施し、温度応力の発生メカニズムを明らかにしている。そして、温度応力はクリープにより著しく緩和されることを指摘している⁽¹³⁶⁾。Carlson は、履歴理論をもとにした時間増分解析法による温度応力のクリープ解析法についての基本的な考え方を述べている⁽⁸⁰⁾。しかし、当時の段階では厳密なクリープ解析を行う手段がまだ開発されていなかったため、具体的にダムなどを対象として温度応力のクリープ解析を行うまでには至らなかった。今日と基本的には同じ形で温度応力のクリープ解析が行われたのは、マスコンクリートの理論的研究が盛んとなった 1950~1960 年代以降である。Mendelson らは、コンクリート粘弾性構成則として状態方程式法を用いてクリープ問題に対する一般的な基礎方程式を導き、板における温度応力などを解析している。基礎方程式の解法は逐次計算法を用いている⁽¹³⁷⁾。Hansen はレオロジーモデル（バーガースモデル）により、コンクリート構成則の統一的記述を試みている⁽¹³⁸⁾。Arutyunyan は、履歴理論によるコンクリート粘弾性構成則を用い、多軸応力場におけるクリープ応力解析問題に関する一般的な基礎方程式を導いている⁽¹³⁹⁾。Greenbaum らは、有限要素法により軸対象体のクリープ解析を行っている。粘弾性構成則は状態方程式法（時間硬化則とひずみ硬化則）を用いており、硬化則の違いが解析結果に及ぼす影響を明らかにしている⁽¹⁴⁰⁾。Greenbaum の研究は有限要素法を用いてクリープ解析を行った先駆的な研究であり、これ以降温度応力のクリープ解析においても有限要素法が盛んに適用されるようになった。Zienkiewicz らは、有限要素法による内圧を受けるシリンダーおよびトンネル周辺応力のクリープ解析を行っている。構成則はレオロジーモデルを用いており、これにより粘弾性クリープの履歴依存性を考慮することが可能なことを述べている⁽¹⁴¹⁾。原口らは、ダムかさ上げ時の温度応力を有限要素法により検討している。コンクリートの粘弾性構成則は状態方程式法を用いている⁽¹⁴⁵⁾。吉岡らは、実構造物の拘束系を単純な一軸拘束モデルに置換し、クリープを

考慮したモデルの挙動に関する基礎方程式を導き、これにより温度応力を求める手法を提案している。クリープ則は、履歴理論を基本としている⁽⁸⁷⁾。大崎らは、マスコンクリートの粘弾性問題に対する取り扱いに関して、(1)クリープ則は状態方程式法を用い、クリープにおける時効性ならびに温度依存性は載荷材令影響係数と温度移行関数で考慮する(2)積算温度依存型の弾性係数を用いること等を提案している⁽¹³³⁾。山崎らは、クリープ関数を用いた履歴理論を採用した有限要素解析により、マツスラブの温度応力に対するスラブ形状および基礎剛性の影響を明らかにしている⁽¹³¹⁾。前川らは、膨張材の温度ひびわれ制御効果を有限要素解析により検討している。解析では、クリープ予測モデルとして Bažant らによるクリープ関数を用いた線形重ね合わせモデルを採用している⁽¹⁴²⁾。横山は、水槽側壁の温度応力を有限要素法により解析している。粘弾性構成方程式はレオロジーモデルを用いた状態方程式法を採用している⁽¹⁴³⁾。

以上のように、コンクリートのクリープおよびリラクセーションの挙動を考慮して温度応力の解析を行う場合、その解析手段としては有限要素法などの数値解析手法が適用性の面で最も有力であると考えられる。一方、解析で必要となるコンクリートの粘弾性構成式については、現在までほとんどの場合クリープ特性が用いられてきた。しかし、温度応力のリラクセーション解析で用いる粘弾性構成式はリラクセーション特性による方が都合よく記述できるので、温度応力のリラクセーション挙動に対する解析手法の確立のためには、若材令コンクリートのリラクセーション特性の解明とこれを用いた解析手法の検討が必要である。

2. 4. 4 クリープならびにリラクセーション簡易解析手法

温度応力に対するクリープの影響は、温度応力の研究が本格化した1930年代からすでに認識されていたことは前述のとうりであるが、温度応力ならびにクリープに関するこの頃の理論的研究は、まだその端緒を開いたばかりであった。一方、ダムコンクリートのクリープ特性については、当時から精力的に実験が行われており、その成果は実測ひずみを応力に変換する際の有効弾性係数 (effective modulus of elasticity) の評価、さらにはダムコンクリートの応力、変形などを算定する際の持続弾性係数 (sustained modulus of elasticity) の評価などに用いられてきた。このような経緯から、当時の温度応力のクリープ解析法は、クリープ特性から導いた有効弾性係数あるいは持続弾性係数を用いる簡易解析手法が大多数であった。以下に当時から現在に至るまでのクリープ簡易解析に関する研究の流れを概観する。

McHenry は、履歴理論によりクリープ関数を用いたコンクリート粘弾性構成方程式を導き出し、これを基に実測ひずみを応力へ変換するための実用的手法 (step method) を提案している⁽¹⁴⁴⁾。Raphael らは、step method を用いて、Shastaダムにおける実測ひずみの応力への変換を試みている⁽¹⁰³⁾。Carlson らは、マスコンクリートに対する各種の養生効果を、step method を用いた

数値実験により明らかにしている⁽¹⁰⁴⁾。君島は、ダムコンクリートのクリープ特性とその数学的表現方法について検討を行っている。さらに、step methodにより実測ひずみを応力に変換し、得られた応力が弾性理論による計算値とかなり異なることを指摘している⁽¹²⁷⁾⁽¹²⁸⁾。小沢は、Compensation Line 法および差分法を用いたダムコンクリートについての温度応力解析を報告している。解析ではクリープの影響を考慮するためクリープ特性から推定したリラクセーション関数を用いている⁽³⁷⁾⁽¹⁴⁵⁾。Trost は、変動応力場におけるコンクリートの経時的な変形式として、クリープ係数を含んだ簡単な代数方程式を用いることを提案している⁽¹⁴⁶⁾。Bazant は、Trost の変形式を増分形式に改めることにより、コンクリートの弾性係数ならびにクリープ係数の材令に伴う変化が考慮出来ることを報告している⁽¹⁴⁷⁾。ACI 207 委員会は、拘束応力の算定の際、持続弾性係数を用いてクリープの影響を考慮する方法を提案している⁽⁸⁹⁾。塚山は、温度応力の簡易計算法において、若材令コンクリートのクリープ試験をもとに決定した有効弾性係数 ($E_e = 0.63E$) によりリラクセーションの影響を考慮している⁽⁸⁶⁾。岩城らは、新旧コンクリートの打継部の温度応力の計算法において、各タイムステップでの弾性応力増分に対して、クリープ係数から求めた応力低減係数を適用することによりリラクセーションの影響を考慮している⁽¹³²⁾。野中は、応力緩和関数を用いた一軸応力下における積分方程式型の構成式をもとにし、これを簡易的に解くことにより温度応力を求める解析法を提案している⁽¹¹⁰⁾⁽¹²⁴⁾⁽¹⁴⁸⁾。崎本らは、壁体の温度応力ならびにひずみの実測値をもとに、温度応力に対するクリープ低減率を算出している⁽¹⁴⁹⁾。前野らは、大断面ボックスカルバートの温度応力とひずみの実測値をもとに、温度応力解析においてクリープの影響を考慮するための有効弾性係数に対する合理的な評価法について検討している⁽¹⁵⁰⁾。

以上のように、クリープ簡易解析法としては、現在、有効弾性係数あるいは応力低減係数を用いる方法が最も一般的である。クリープ簡易解析法は、いずれの方法も基本的にはコンクリートのクリープを考慮した構成式を簡略的に表現し、これをもとにクリープの影響を考慮するものである。これらの方法は、温度応力に対するクリープの影響を簡便に考慮することができる点で実用的価値は高いが、吉岡が指摘するように⁽¹⁵¹⁾、その理論的根拠は必ずしも明確ではない。したがって、今後さらに合理的なクリープあるいはリラクセーション簡易解析手法について検討を進めていく必要がある。

<参考文献>

- (1) Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior: Boulder Canyon Project Final Reports, Part-Cement and Concrete Investigations, Bull. 1, Thermal Properties of Concrete, 1940
- (2) R. F. Blanks: Boulder Dam Cement and Concrete Studies, Engineering News-Record, Nov. 22, pp. 648~651, 1934
- (3) L. J. Mitchell: Thermal Properties of Hardened Concrete, ASTM; STP, 169, pp. 129~135, 1956
- (4) A. Klein, D. Pirtz and R. F. Adams: Thermal Properties of Mass Concrete During Adiabatic Curing, Symposium on Mass Concrete, ACI SP-6, pp. 199~218, 1962
- (5) A.M.Neville (後藤幸正, 尾坂芳夫監訳): コンクリートの特性, コンクリートの温度特性, 技報堂出版, pp. 367~374, 1979
- (6) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書: マスコンクリートの温度応力推定法に関する既往の研究とその総括, pp. 1~17, 日本コンクリート工学協会, 1985
- (7) 青柳征夫: 発電用原子炉構造物へのプレストレストコンクリートの適用に関する資料調査, 電力中央研究所 技術研究所報告, No. 67037, 1967
- (8) 阿部博俊, 青柳征夫: コンクリートジャーナル, Vol. 8, No. 1, pp. 62~71, 1970
- (9) 徳田 弘, 伊藤 勉: コンクリートの熱拡散率、熱伝導率、および比熱について, 電力中央研究所 技術研究所報告, 土木. 63014, 1964
- (10) 徳田 弘, 庄谷征美: コンクリートの熱特性の測定と二、三の考察, 土木学会論文報告集, 第212号, pp. 89~98, 1973
- (11) 原田 有: 高温時に於けるセメントおよびコンクリートの熱伝導率の変化, 建築学会論文集, No. 49, pp. 1~8, 1954
- (12) 柳田 力: マスコンクリートにおける上昇温度の実用的推定法, 土木技術資料11-4, pp. 3~9, 1969
- (13) Materials Laboratory Procedures Manual, U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation
- (14) 西沢紀昭: コンクリートおよびモルタルの熱拡散率測定方法に関する実験報告, 電研所報, Vol. 4, No. 2, pp. 66~76, 1954
- (15) W. T. Thomson: A Method of Measuring Thermal Diffusivity and Conductivity of Stone and Concrete, Proc., ASTM, Vol. 40, pp. 1073~1081, 1940
- (16) たとえば, 栗野誠一, 葛岡常雄, 伝熱工学, 丸善, pp. 5~7, 1954
- (17) たとえば, D. C. Allen and C. P. Thorne: The Thermal Conductivity of Concrete,

- Magazine of Concrete Research, Vol. 15, No. 43, pp. 39~48, 1963
- (18) D. Whiting, A. Litvin and S. E. Goodwin: Specific Heat of Selected Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 75, No. 7, pp. 299~305, 1978
- (19) たとえば, 野尻陽一: コンクリート打設後の温度計算方法について, コンクリートジャーナル, Vol. 5, No. 8, pp. 33~40, 1967
- (20) 有泉 昌, 小松原正夫, 安沢俊二: ダムに使用されたセメントの特性について, 土木研究所報告, 昭和31年10月, pp. 1~21, 1954
- (21) 長島 弘: コンクリート打ち込み後の温度変化に関する研究 第1報, 普通ポルトランドセメントの水和熱と時間温度関数, 日本建築学会論文報告集, 第268号, pp. 1~8, 1978
- (22) G. Verbeck and C. Foster: Proc., ASTM, Vol. 50, 1950
- (23) 長島 弘: 寒中コンクリートの断熱保温養生の実用図表作成, コンクリート工学論文, Vol. 17, No. 11, pp. 117~130, 1979
- (24) E. Rastrup: Heat of Hydration in Concrete, Magazine of Concrete Research, pp. 79~92, sept. 1954
- (25) 佐藤純夫, 川田純夫: ポルトランドセメントの水和熱およびモルタル強度などを計算する新しい公式の提案,
- (26) 井上 毅, 長滝重義: セメントの水和熱からのコンクリート断熱温度上昇量の予測, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 第5部, pp. 442~443, 1988
- (27) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告: マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括, コンクリート工学, Vol. 21, No. 8~Vol. 22, No. 1, 掲載分抜刷, 1984
- (28) 田沢栄一, 松岡康訓: マスコンクリートの施工法, 大成建設株式会社技術研究所 研究報告, No. 238, 1976
- (29) 塚山隆一, 宮地日出男: 各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇, セメント技術年報X X V, pp. 220~224, 1971
- (30) 塚山隆一: コンクリートの断熱温度上昇推定, セメント技術年報X X X, pp. 408~410, 1976
- (31) 田沢栄一, 松岡康訓: マスコンクリートの施工法, コンクリート工学, Vol. 15, No.10, pp. 1~7, 1977
- (32) 平賀友晃, 倉林 清: コンクリートの温度上昇に関する既往の研究成果について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 1~10, 1982
- (33) 山川秀次, 原口 晃, 阿部博俊: 暑中に打設した富配合なコンクリートの温度上昇特性

- に関する一考察，土木学会第36回年次学術講演会概要集，第5部，pp. 41～42，1981
- (34) 小野 定：各種断熱温度上昇試験方法の比較，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C2，日本コンクリート工学協会，pp. 7～10，1982
- (35) 横田紀男，鈴木康範，原田修輔，佐藤利幸：断熱温度上昇試験方法に関する一考察，セメント技術年報XXXIX，pp. 233～236，1985
- (36) 佐藤利幸，鈴木康範，原田修輔，横田紀男：新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量，コンクリート工学年次論文報告集，第9巻，第2号，pp. 1～6，1987
- (37) 小沢章三：マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究(1)，発電水力，57号，pp. 48～61，1962
- (38) 山川秀次，田辺忠顕，笠原 清：熱伝達率の試験ならびに実測例，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C7，日本コンクリート工学協会，pp. 19～26，1982
- (39) 小野 定：マスコンクリート打ち込み後の温度上昇に関する二，三の考察，コンクリート工学，Vol. 15，No. 1，pp. 42～50，1977
- (40) たとえば，一色尚次：伝熱工学，基礎機械工学全書 9，森北出版，1967
- (41) A. D. Ross and J. W. Bray：The Prediction of Temperature in Mass Concrete by Numerical Computation，Magazine of Concrete Research，pp. 9～20，Jan. 1949
- (42) 長田晴道，小野 定：温度解析方法に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C2，日本コンクリート工学協会，pp. 35～48，1982
- (43) R. W. Carlson：A Simple Method for the Computation of Temperatures in Concrete Structures，ACI Jour.，Proc.，Vol. 34，Nov. - Dec.，pp. 89～102，1937
- (44) 杉山章男：科学工業工学 熱工学総論，地球出版，1969
- (45) たとえば，L.J.Segerlind（川井忠彦監訳，築地恒夫，風間悦夫，川端康洋共訳）：応用有限要素解析，丸善，1978
- (46) C. A. Brebbia（神谷紀生，田中正隆，田中喜久昭共訳）：境界要素法入門，培風館，1980
- (47) B. A. Finlayson（鷺津久一郎，山本善之，川井忠彦共訳）：重みつき残差法と変分原理および流体力学、伝達、物質移動への応用，培風館，1974
- (48) W. Visser：A Finite Element-Method for the Determination of Non-Stationary Temperature Distribution and Thermal Deformations，Proc. 1st Conf. Matrix Mathematics in Structure Mechanics，1967
- (49) たとえば，マスコンクリートの温度応力研究委員会：マスコンクリート温度応力の計算

方法とそのパソコンプログラム，日本コンクリート工学協会，1985

- (50) R. W. Nurse: Steam Curing of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 1, No. 2, pp. 77~88, 1949
- (51) Commission 42-CEA: Properties of Set Concrete of Early Ages-State of Art Report, RILEM, Vol. 14, No. 84, pp. 399~450, 1981
- (52) J. M. Plowman: Maturity and the Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research, March 1956, pp. 13~22
- (53) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘: マスコンクリートの基本的特性に関する一考察, セメント技術年報XXXIV, pp. 230~233, 1980
- (54) 竹下治之, 浅沼 潔, 横田秀彦: マスコンクリートの基本的特性について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 27~34, 1982
- (55) 洪 悦郎: コンクリートの強度推定実用法とその応用, セメント技術年報XIII, pp. 244~249, 1959
- (56) 笠井芳夫: コンクリートの初期圧縮強度推定方法, 日本建築学会論文報告集, 第141号, pp. 1~10, 1967
- (57) H. S. Lew and T. W. Reichard: Mechanical Properties of Concrete at Early Ages, ACI Jour., Proc., Vol. 75, No. 10, pp. 533~542, 1978
- (58) 向井 毅, 菊地雅史, 深見剛至: 加熱養生したコンクリート強度発現の推定に関する研究, セメント技術年報XXVIII, pp. 286~294, 1974
- (59) 仕入豊和, 地濃茂雄: コンクリートの初期強度におよぼす温度条件(20~90℃)の影響, 日本建築学会論文報告集, 第320号, 1982
- (60) 大井孝和: 養生温度の変動がコンクリート強度発現におよぼす影響, 日本建築学会論文報告集, 第307号, pp. 1~11, 1981
- (61) たとえば, 土木学会: コンクリート標準示方書(昭和61年度制定)改訂資料, コンクリートライブラリー, 第61号, pp. 52~53, 1986
- (62) たとえば, 梅原秀哲, 川原場博美, 田辺忠顕: 発電所基礎マットにおける温度応力の実測とその三次元解析, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 65~72, 1984
- (63) J. H. Emanuel and J. L. Hulsey: Prediction of the Thermal Coefficient of Expansion of Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 74, No. 4, pp. 149~155, 1977
- (64) たとえば, C. Berwanger and A. F. Sarkar: Effect of Temperature and Age on Thermal Expansion and Modulus of Elasticity of Concrete, ACI, SP39-1,

pp. 1~22, 1973

- (65) たとえば, A. A. Fahmy and A. N. Ragai: Thermal Expansion Behavior of Two-Phase Solids, Jour. of Applied Physics, Vol. 41, No. 13, pp. 5108~5111, 1970
- (66) J. H. A. Brahtz: Stress Distribution in Wedges with Arbitrary Boundary Forces, Physics, Vol. 4, No. 2, 1933
- (67) H. G. Smith: Photo-Elastic Determination of Shrinkage Stresses, Tran., ASCE, Vol. 101, pp. 927~944, 1936
- (68) 川本 眺万: マッシブな構造物の収縮応力に関する光り弾性学的基礎的研究, 土木学会論文集, 第61号, pp. 29~37, 1959
- (69) 森 忠次: 熱応力の光弾性実験法に関する研究, 土木学会論文集, 第66号, pp. 21~27, 1960
- (70) 森 忠次: 一辺が拘束された三角形ならびに四角形板の熱応力と拘束度について, 土木学会論文集, 第89号, pp. 45~53, 1963
- (71) 村 幸雄, 中村慶一, 大久保忠良, 飯田隆一: アーチダムの温度応力に関する理論的考察, 土木研究所報告, pp. 73~114, 1959
- (72) O. C. Zienkiewicz: The Computation of Shrinkage and Thermal Stresses in Massive Structures, Proc., Jour. Institution of Civil Engineers, Vol. 4, Part 1, pp. 88~100, 1955
- (73) M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and J. L. Topp: Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, Jour. Aeronautical Science, Vol. 23, No. 9, pp. 805~824, 1956
- (74) R. W. Clough: The Finite Element in Plane Stress Analysis, Proc. 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburg, Pa. , Sept. 1960
- (75) R. W. Clough and E. I. Wilson: Stress Analysis of a Gravity Dam by the Finite Element Method, RILEM Bull., No. 9, June 1963
- (76) O. C. Zienkiewicz and Y. K. Cheng: Stress in Buttress Dams, Water Power, pp. 69~75, Feb. 1965,
- (77) 林 正夫, 北原義浩, 金川 忠: 非均質、任意形状の物体の温度応力の解析法(平面ひずみ状態): 電力中央研究所 技術研究所報告, No. 67063, 1967
- (78) 山下祐司, 田辺忠顕: 有限プリズム法による温度応力解析法と解析例, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 59~64, 1984
- (79) 椿 龍哉: 外部拘束を受けるマスコンクリートの温度応力解析における境界要素の適用,

- 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 83~86, 1984
- (80) R. W. Carlson: Temperature and Stress, ACI Jour., Proc., Vol. 34, pp. 497~515, March-April 1938
- (81) たとえば, S. Timoshenko and J. N. Goodier: Theory of Elasticity, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1951
- (82) 小野 定: マスコンクリートの温度ひびわれ制御に関する一考察, セメント技術年報 XXXⅢ, pp. 440~443, 1979
- (83) たとえば, 前野宏司, 青景平昌, 伊藤祐二: 大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 15~20, 1984
- (84) たとえば, 建設省河川局: 多目的の建設, 第3巻, 土木施工管理技術研究会, 1977
- (85) 小野 定: マスコンクリートの外部拘束による温度ひびわれ制御について, セメント技術年報 XXXⅣ, 1980
- (86) 塚山隆一: マッシュな鉄筋コンクリート構造物の温度ひびわれ発生条件, セメント技術年報 XXXⅠ, pp. 433~436, 1977
- (87) 吉岡保彦, 米沢敏男, : 単純拘束モデルによるマスコンクリートに生じる熱応力解析と実験, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 91~96, 1982
- (88) マスコンクリートの温度応力研究委員会: 外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案, 日本コンクリート工学協会, 1985
- (89) ACI 207 Committee: Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 70, No. 7, pp. 445~470, 1973
- (90) 吉岡保彦, 米沢敏男: マスコンクリートの温度応力算定に用いる外部拘束度に関する研究, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 25~28, 1986
- (91) 永山 功, 矢沢克敏: コンクリートダム の温度応力解析 (Ⅱ), 土木技術資料 22-9, pp. 26~31, 1980
- (92) 小野 定, 櫛田康仁: マスコンクリートの外部拘束に関する一考察, 土木学会第36回年次学術講演会概要集, 第5部, pp. 45~46, 1981
- (93) 関島謙蔵: マスコンクリートにおける基礎くい群の拘束度の推定法, セメント技術年報 XXXⅤⅠ, pp. 486~489, 1982
- (94) 石川雅美, 前田強司, 西岡 哲, 田辺忠顕: 大型試験体によるマスコンクリートの温度

- 応力実験，コンクリート工学年次論文報告集，10-2，pp. 169～174，1988
- (95) 岡田 清，六車 熙編：改訂新版 コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，1987
- (96) 土木学会：昭和61年度制定 コンクリート標準示方書，設計編，1986
- (97) 大島久次，池永博威：高強度コンクリートのひびわれに関する研究外，日本建築学会関東支部第40回技術研究発表会，1970
- (98) 狩野春一監修：コンクリート技術辞典，オーム社，1967
- (99) 大野和男：モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究，北大工学部研究報告，9号，1953
- (100) I. E. Houk, J. A. Paxton and D. L. Houghton: Prediction of Thermal Stress and Strain Capacity by Tests on Small Beams, ACI Jour., Proc., Vol. 67, No. 3, pp. 253～261, 1970
- (101) D. L. Houghton: Determining Tensile Strain Capacity on Mass Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 73, No. 12, pp. 691～700, 1976
- (102) T. C. Liu and E. McDonald: Prediction of Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 75, No. 5, pp. 192～197, 1978
- (103) J. M. Raphael: The Development of Stresses in Shasta Dam, Tran., ASCE, Vol. 118, pp. 289～309, 1952
- (104) R. W. Carlson and D. P. Thayer: Surface Cooling of Mass Concrete to Prevent Cracking, ACI Jour., Proc., Vol. 29, No. 8, pp. 107～120, 1959
- (105) 原口 晃，田辺忠顕，阿部博俊，内田敏久：重力式コンクリートダムのかさ上げ時における熱応力解析，コンクリート工学，Vol. 15, No. 10, pp. 18～26, 1977
- (106) 辻 幸和，横田紀男，渡辺夏也，坂田憲逸，鈴木康範：膨張コンクリートのマスコンクリートへの適用に関する実物大実験，セメント技術年報 XXXIV，pp. 184～188，1980
- (107) 井村力生，杉原一雄，土岐高史，岡田克也，両角昌公，相沢 完：マスコンクリートの拘束ひずみおよび膨張材によるひびわれ制御に関する実物大拘束実験，セメント技術年報 XXX，pp. 203～207，1976
- (108) マスコンクリートの温度応力研究委員会：マスコンクリート工事の温度応力制御の演習，日本コンクリート工学協会，1985
- (109) たとえば，毛利虎雄：配合とひびわれ，コンクリートジャーナル，Vol. 11, No. 9, pp. 12～18，1973
- (110) 野中資博：普通ポルトランドセメントコンクリートの温度ひびわれ発生に関与する諸物性について，農業土木学会論文集，第91号，pp. 51～58，1981

- (111) R. W. Carlson, D. L. Houghton and M. Polivka: Causes and Control of Cracking in Unreinforced Mass Concrete, ACI Jour., Proc., Vol. 76, No. 8, pp. 821~837, 1979
- (112) 吉岡保彦, 両角昌公, 渡辺真次: マスコンクリートのひびわれ予測システムの開発とその適用例, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 29~34, 1984
- (113) 木村克彦, 小野 定: マスコンクリートの温度ひびわれ発生評価方法に関する研究, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp. 61~70, 1987
- (114) たとえば, 飯田隆一: 新体系土木工学 ダムの設計, 土木学会, 1980
- (115) 小野 定: マスコンクリートの温度ひびわれ発生有無の評価手法に関する研究, 土木学会第36回年次学術講演会概要集 第5部, pp.51~52, 1981
- (116) 桑原隆司, 森永 繁: マスコンクリートの温度応力によるひびわれ発生条件とひびわれ発生の危険性評価方法, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 61~68, 1982
- (117) 山崎敏敏: マスコンクリートの外部拘束とひびわれ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 503~504, 1978
- (118) J. A. Hanson: A 10-Year Study of Creep Properties of Concrete, U.S.Bureau of Reclamation, Concrete Laboratory Report No. SP 38, 1953
- (119) A. D. Ross: Creep of Concrete under Variable Stress, ACI Jour., Proc., Vol. 54, No. 9, pp. 739~758, 1958
- (120) T. S. Chang and C. E. Kesler: Correlation of Sonic Properties of Concrete with Creep and Relaxation, Proc., ASTM, Vol. 56, pp. 1257~1272, 1956
- (121) M. T. Taylor and G. K. Maurer: Short-term Stress Relaxation of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 84, pp. 123~135, 1973
- (122) 西林新蔵, 木山英郎: コンクリートの応力緩和に関する一研究, 土木学会論文報告集, 214号, pp. 145~153, 1975
- (123) 木山英郎, 西林新蔵, 井上正一, 北村安朗: コンクリートの引張緩和現象に関する一考察, 鳥取大学工学部研究報告, 第7巻, pp. 75~84, 1976
- (124) 野中資博: コンクリートの引張応力緩和に関する研究, 農業土木学会論文集, 96号, pp. 58~63, 1981
- (125) W. H. Chamberlin: Investigation of Creep Characteristics of Shasta Dam Concrete, Rep. No. C-805, Concrete Labo. , U.S.Bureau of Reclamation, 1955
- (126) M. Polivka, D. Pirtz and R. F. Adams: Studies of Creep in Mass Concrete,

Symposium on Mass Concrete, ACI SP-6, pp. 257~285, 1962

- (127) 君島博次：ダムコンクリートのクリープに関する研究（第1部），電力中央研究所技術研究所所報，第10巻，第5,6号，pp. 225~268, 1960
- (128) 君島博次：ダムコンクリートのクリープに関する研究（第2部），電力中央研究所技術研究所所報，第10巻，第5,6号，pp. 269~319, 1960
- (129) 原口 晃，河角 誠，田辺忠顕，岡沢孝雄：黒田ダムかさ上げ工事におけるコンクリートの打設計画（その1），電力中央研究所報告，375561, 1976
- (130) CEB/FIP: Model Code for Concrete Structures, 1978
- (131) たとえば，山崎敏敏，宮下 丘，速水由紀夫：種々の条件下におけるスラブ状マスコンクリートの熱応力について，第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C7，日本コンクリート工学協会，pp. 77~82, 1984
- (132) 岩城 良，夏目忠彦，村山八洲雄，村田俊彦，大貫博司：セメント水和熱に起因する温度応力の解析手法に関する研究，鹿島建設技術研究所年報，第28号，pp. 45~52, 1975
- (133) 大崎幸雄，吉川弘道，河田秋澄：マスコンクリートの温度応力解析に適用する構成方程式の検討，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C2，日本コンクリート工学協会，pp. 49~56, 1982
- (134) ACI 209 Committee: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI SP-27, pp. 51~93, 1971
- (135) Z. P. Bazant and L. Panula: Practical Predictions of Time-Dependent Deformations of Concrete, Part 1-4, Material and Structures, Vol. 11, No. 65, No. 66, 1978, Vol. 12, No. 69, 1979
- (136) R. F. Blanks, H. S. Meissner & C. Rawhouser: Cracking in Mass Concrete, Proceedings, ACI Jour., Proc., Vol. 34, pp. 477~495, 1938
- (137) A. Mendelson, M. H. Hirschberg & S. S. Manson: A General Approach to the Practical Solution of Creep Problems, Jour. Basic Engineering, Tran., ASME, Series D. , 81, pp. 585~598, 1959
- (138) T. C. Hansen: Creep and Stress Relaxation of Concrete, Proc., Swedish Cement and Concrete Research Institute, NR 31, 1960
- (139) N. Kh. Arutyunyan: Some Problems in the Theory of Creep in Concrete Structures, Pergamon Press, 1966
- (140) G. A. Greenbaum and M. F. Rubinstein: Creep Analysis of Axisymmetric Bodies Using Finite Elements, Nuclear Engineering and Design, Vol. 7, pp. 379~398, 1968

- (141) O. C. Zienkiewicz, M. Watson & I. P. King: A Numerical Method of Visco-Elastic Stress Analysis, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 10, pp. 807~827, 1968
- (142) 前川憲一, 鈴木康範, 原田修輔, 辻 幸和: 膨張コンクリートを用いたマスコンクリートの温度応力解析, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 87~94, 1984
- (143) 横山博司: クリープを考慮した温度応力の検討他, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 41~44, 1984
- (144) D. McHenry: A New Aspect of Creep in Concrete and its Applications to Design, Proc., ASTM, Vol. 43, pp. 1069~1087, 1943
- (145) 小沢章三: マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究(Ⅱ), 発電水力, 59号, pp. 19~39, 1962
- (146) H. Trost: Spannungs-Dehnungs-Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgerungen für Stabtragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, beton 1966, H. 6.
- (147) Z. P. Bazant: Prediction of Creep Effects Using Adjusted Effective Modulus Method, ACI Jour., Proc., Vol. 69, pp. 212~217, 1972
- (148) 野中資博: マスコンクリート構造物の温度ひびわれ発生についての一考察, コンクリート工学, Vol. 16, No. 6, pp. 89~95, 1978
- (149) 崎本純治, 十河茂幸, 三浦律彦: 水和熱によって発生する鉄筋コンクリート壁体の温度応力について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 105~112, 1982
- (150) 前野良司, 青景平昌, 伊藤祐二: 大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 15~20, 1984
- (151) 吉岡保彦: マスコンクリート構造物におけるひびわれ防止に関する研究, 京都大学学位論文, 1985

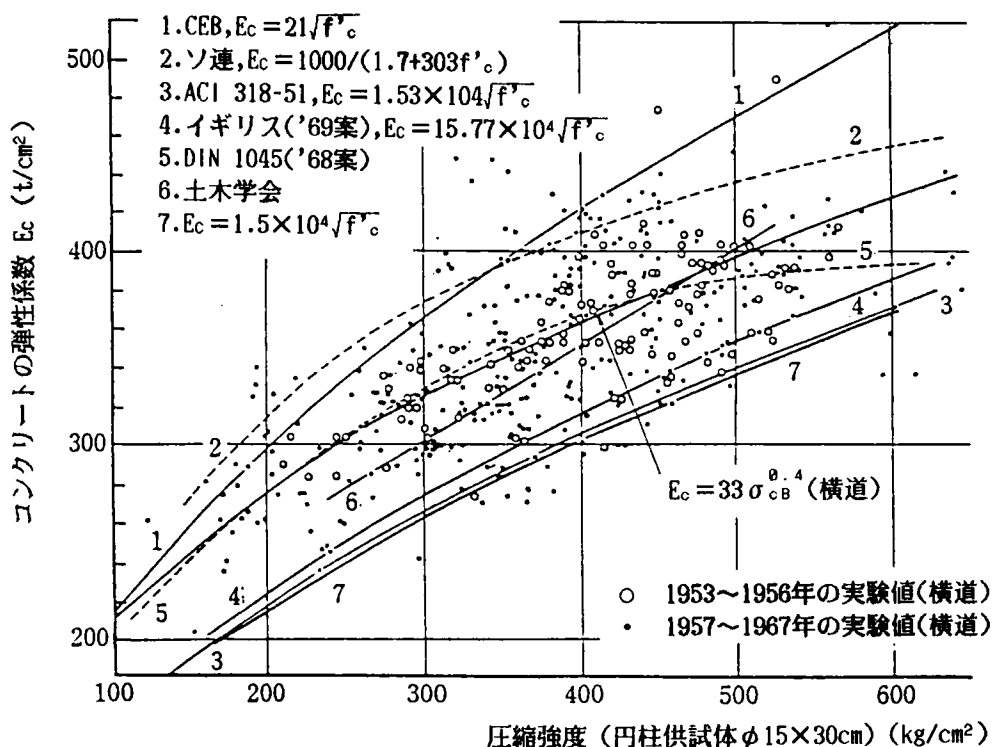


図2-1 弾性係数と圧縮強度との関係⁽⁶¹⁾

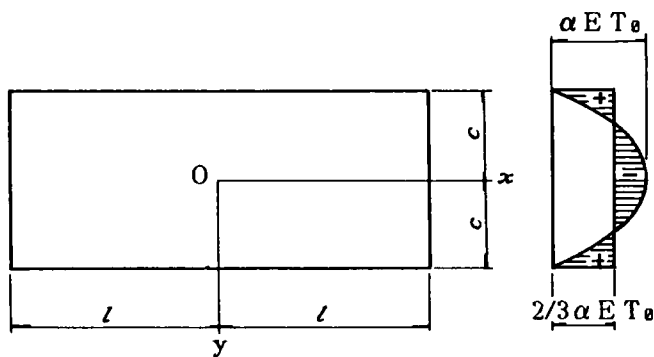


図2-2 矩形ブロックに生ずる内部拘束応力

第3章 マスコンクリートの温度ひびわれ危険度評価に関する研究

3.1 概説

マスコンクリートの温度ひびわれ防止対策について検討を行う場合、対象とする構造物について種々の施工条件を想定した温度応力解析を実施し、これらの結果をもとに各々の施工条件に対する温度ひびわれの危険性を評価することが必要となる。マスコンクリートの温度応力解析については、現在、有限要素法などの数値解法を始めとして、各種の簡易解法⁽¹⁾に至るまで数多くの解析手法が用いられており、また最近では三次元的な解析も可能なJCI温度応力委員会法(Compensation Plane および Line 法)⁽²⁾も提案されている。しかし、このような各種解析手法の中において、現段階で最も適用範囲が広く一般的な温度応力解析手法と考えられるのが有限要素法などの数値解法であり、最近のコンピュータ技術の進歩により、パーソナルコンピュータでも実構造物の温度応力解析にこれらの数値解法を適用することが可能となった⁽³⁾。

このような解析手法の進歩、普及により、温度応力解析に関しては解析諸条件の決定など細部においてはいくつかの重要な問題点が残されてはいるものの、今やほとんどの構造物に対して一応の温度応力解析が可能な段階にまで達していると言って過言ではない。

一方、温度ひびわれ予測を行う際のひびわれの危険度の評価については、温度応力解析から得られた応力あるいはひずみと、コンクリートの引張強度あるいはひずみ能力とを対比させてその危険度を評価するのが一般的であり、この際、温度応力が引張強度を上回った時に温度ひびわれが発生するとした確定論的な評価を行うことが多い⁽⁴⁾。しかし、温度応力解析から得られる応力ならびにひずみと、それに対するコンクリートの引張強度およびひずみ能力などは、いずれも生来的に誤差とばらつきを有する量であり、従って、これらをもとにして合理的にひびわれ危険度の評価を行うためには確率論的な取り扱いが必要になる。このような立場から、最近温度ひびわれの危険度を表す指数と温度ひびわれ発生確率との関係を求め、これにより確率論的な温度ひびわれ危険度の評価を試みた報告もいくつか見受けられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、これらの研究のいずれもが指数の算出あるいは温度応力解析に特殊な手法を採用してあり、その適用性に限界がある。

本章では、温度ひびわれ予測の前提となる温度解析ならびに温度応力解析に、現在最も適用範囲が広いと考えられる有限要素法を用い、多数の実構造物について算定したひびわれ危険指数と各構造物におけるひびわれ観察結果を解析することにより、ひびわれ危険指数とひびわれ発生との対応、ひびわれ危険指数のばらつきさらにはひびわれ危険指数の適用性などを明らかにするも

ので、本章で得られる知見は合理的な温度ひびわれ予測手法を確立するための有力な資料となるものと考えられる。なお、本章でとりあげるひびわれ危険指数は、一般性の高い指数であることを念頭において、応力と強度による危険指数、ひずみとひずみ能力による危険指数、土木学会提案の温度ひびわれ指数および温度上昇特性から算出した危険指数の合計4種類とした。

3. 2 温度ひびわれ予測手法

本研究で用いる温度ひびわれ予測手法は、温度解析、温度応力解析、温度応力のクリープ解析、および温度ひびわれ危険指数によるひびわれ危険度の評価の4段階よりなるが、本節では各段階における解析方法の概要ならびに解析で用いた諸定数の決定方法等について述べる。なお、温度解析、応力解析およびクリープ解析には、有限要素法を用いたが、有限要素法による各解析の基本的定式化については関連の参考書⁽⁸⁾にゆずり、ここでは説明を省略する。

3. 2. 1 温度解析

(1) 熱的性質

温度解析で必要となるコンクリートの発熱量、熱伝導率、比熱および境界面における熱伝達率などは、既往の研究成果ならびに数値実験により決定した。以下にその詳細を述べる。

(a) コンクリートの発熱量

コンクリートの発熱量は、セメントの水和熱から算定する方法と断熱温度上昇を用いる方法があるが、本研究では、蓄積データが比較的豊富な後者の方法を採用した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。断熱温度上昇特性評価式は、次式を採用した。

$$T_{ad} = K (1 - e^{-\alpha t}) \quad (3-1)$$

ここに、 K 、 α ：実験定数

t ：材令 (hr)

実験定数 K 、 α については、普通セメント使用のコンクリートに対しては、表3-1に示す田沢⁽¹⁰⁾らの実験結果を適用し、コンクリートの打ち込み温度と単位セメント量から算出した。一方、その他のセメント使用のコンクリートに対しては、断熱温度上昇試験から算定した値を用いた。

(b) 熱伝導率, 比熱

コンクリートの熱伝導率および比熱は、コンクリートの配合、骨材岩質あるいは含水量などにより変化する。従って厳密には、解析対象コンクリートについての熱伝導率および比熱測定試験から、これらの値を求める必要がある。しかし、これらの試験は、一般の現場あるいは試験室等で容易に実施できるものではない。そこで本研究では、温度解析で用いる熱伝導率と比熱の実用的な取り扱い、あるいは決定法を検討するために、熱伝導率、比熱およびコンクリート打設温度が温度解析結果におよぼす影響を、3次元有限要素法を用いた数値実験により明らかにした⁽¹¹⁾。

数値実験では、図3-1に示すような地盤の基礎フーチングを解析モデルとした。数値実験因子は、熱伝導率、比熱ならびに打設温度の3因子とした。これらの実験因子の水準数と各水準値は、实际的にこれらの値がとり得る範囲を参考にして決定した^{(12)~(16)}。実験因子の水準値とその他の計算因子を、まとめて表3-2に、また各解析ケースにおける解析条件を表3-3に示す。三次元熱伝導解析で用いた有限要素は、図3-2に示すような8節点6面体複合要素である。8節点6面体複合要素は図3-2に示すように、4節点4面体要素を組み合わせ得られるもので、その要素特性は4面体要素の特性を用いて容易に求めることができる。本研究で用いた4面体要素特性は、図3-3に示すような最も基本的な3次元1次要素であり、要素の温度未知関数 ϕ は次式で表される

$$\phi = [N] \{\phi_e\} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad [N] &= [N_i N_j N_k N_l] \\ \{\phi_e\}^T &= [\theta_i \theta_j \theta_k \theta_l] \\ N_p &= a_p + b_p x + c_p y + d_p z \\ p &= i, j, k, l \end{aligned}$$

ただし、 N : 形状関数
 i, j, k, l : 要素節点
 $\theta_i, \theta_j, \theta_k, \theta_l$: 節点における未知関数の値
 x, y, z : 座標値
 a_p, b_p, c_p, d_p : 定数

なお、4面体要素を合成する方法として、本研究では図3-2に示すような分割法から得られる5個の4面体要素の特性を平均化することにより、6面体要素の特性を評価した⁽⁸⁾。図3-4、3-5に、打ち込み温度が10℃と30℃のそれぞれについて、熱伝導率 K を1.19kcal/mh℃とした場

合（Case 1-1）と $K=3.13\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ とした場合（Case 1-2）の中心部と表面部の温度履歴を対比させて示す。各図から、打ち込み温度が変化するとコンクリートの温度上昇の傾向は異なったものとなるが、熱伝導率の影響は打ち込み温度の変化にほとんど影響されないことがわかる。各打ち込み温度とも、熱伝導率が $1.19\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ から $3.13\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ に変化すると、中心部では最大 10°C 程度、一方表面部では 5°C 程度の差異が生じる。さて、前述のように普通コンクリートの熱伝導率は、大部分が $1.90\sim 2.80\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ の範囲内にあるが、熱伝導率がこの範囲内で変化する場合のコンクリート温度上昇におよぼす影響は、解析結果から中心部で最大 5°C 程度、一方表面部では 2°C 以下となることが推定される。従って、温度解析を行うにあたり、熱伝導率を一般的な変動の範囲における中央値、 $2.35\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 程度に仮定しても熱伝導率に起因する解析誤差は中心部では $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 以下、一方表面部では $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下とすることができる。図 3-6，3-7 は、打ち込み温度が 10°C と 30°C において、比熱の変化が中心部と表面部の温度履歴におよぼす影響を示したものである。各図から、打ち込み温度が変化しても、比熱の影響は大差なく、比熱がコンクリートの温度履歴におよぼす影響は全体的に小さい。すなわち、比熱が $0.20\sim 0.28\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ の一般的な変動の範囲内で変化しても、コンクリートの温度上昇におよぼす影響は小さく、中心部で最大 2°C 程度、一方表面部では 1°C 以下となる。また、比熱を温度の関数として解析を行っても定数と考えた場合とほとんど差異を生じない。従って、温度解析を行う際のコンクリートの比熱の値として、その一般的変動の範囲における中央値 $0.24\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ を仮定しても、比熱に起因する解析誤差は、中央部、表面部ともに $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下になると考えられる。以上の数値実験から得られた結論をまとめると次のようになる。

1. 熱伝導率が通常とり得る $1.90\sim 2.80\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 程度の範囲内で変化する場合、コンクリートの温度上昇におよぼす影響は中心部では $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 以内、表面部では $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内である。従って温度解析を行う場合、熱伝導率の値をその変動範囲における中央値 $2.35\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ に仮定しても、熱伝導率の誤差に起因する温度解析誤差は中心部で $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 以内、表面部 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内に収まる。

2. 比熱は比較的温度の影響を大きく受ける。しかし、比熱を温度の関数として非線型解析を行っても、定数とした場合と大差はない。従って、比熱を温度の関数とすることの意義は小さい。比熱が通常の変動範囲 $0.20\sim 0.28\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ の間で変化する場合、温度上昇におよぼす影響は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内である。従って、温度解析において比熱の値を、変動範囲の中央値 $0.24\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ に仮定しても、比熱の誤差に起因する温度解析誤差は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下とすることができる。

このような数値実験で得られた結論をもとに、本研究の温度解析では、全ての解析ケースにおいて熱伝導率を $2.35\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、また、比熱を $0.24\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ に仮定することにした。

(C) 熱伝達率

コンクリート表面における熱伝達率については、最近では図3-8に示す山川らの実験値が報告されている⁽¹⁷⁾。一方、小野は熱伝導数値解析により、温度上昇の推定値に影響を及ぼす要因の影響を検討し、熱伝達率 α に関しては、 $\alpha = 5 \sim 10 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 程度とすれば実用上十分な解析精度が得られることを報告している⁽¹⁸⁾。

本研究では、このような既往の研究成果を参考にしてコンクリート表面における熱伝達率の値を $\alpha = 10.0 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、一方、型枠表面からの熱伝達率については、合板型枠面では $\alpha = 5.0 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、また鋼製型枠面では $\alpha = 12.0 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ とした。

(2) 解析手法

前述のように温度解析は有限要素法により実施した。3次元温度解析で用いた有限要素は、前述の熱伝導率および比熱に関する数値実験と同様、図3-2に示す8節点6面体複合要素である。一方、二次元解析でも、三次元解析と同様、3角形1次要素を組み合わせ得られる4角形複合要素を用いた。

3. 2. 2 温度応力解析

温度応力解析は有限要素法により実施した。以下において、温度応力解析で用いたコンクリートの弾性定数の評価法ならびに解析手法の概要を述べる。

(1) 弾性的性質

マスコンクリートの強度あるいは弾性係数などの力学的性質は、一般的にマチュリティーあるいは有効材令などの関数として評価されている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。本研究では温度応力解析で用いる弾性係数については、岡田らの提案式を参考にした有効材令による評価式を用いて算出した。岡田らは、 $C = 380 \text{ kg/cm}^3$ 、 $w/c = 45\%$ 、 $s/a = 43\%$ 、スランプ $= 8 \pm 1 \text{ cm}$ のコンクリートについて、マチュリティー M ($^\circ\text{Chr}$) と圧縮強度、引張強度、および弾性係数との関係を実験的に求めている⁽²¹⁾。そのうち、弾性係数 E_c (kgf/cm^2) については、次式を提案している。

$$E_c = 5.16 \log_{10} M - 13.1 \quad (500 < M \leq 1000 \text{ の場合}) \quad (3-3)$$

$$E_c = 0.711 \log_{10} M + 0.27 \quad (1000 < M \leq 30000 \text{ の場合}) \quad (3-4)$$

本研究では、上式を他の配合のコンクリートにも近似的に適用できるものと仮定し、次のような任意配合コンクリートに対する弾性係数評価式を導いた⁽²²⁾⁽²³⁾。まず、マチュリティーのか

わりに有効材令 $t_e = M / (30^\circ\text{C} \times 24\text{hr})$ (日) を導入し、かつ式 (3-3), (3-4) を標準養生下、材令28日における弾性係数 $E_{(28)}$ で無次元化する。実験で用いられたコンクリートの $E_{(28)} = 3.32 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であるので最終的に次式が得られる。

$$E_c / E_{(28)} = 1.55 \log_{10} t_e + 0.48 \quad (0.7 < t_e \leq 1.4 \text{ の場合}) \quad (3-5)$$

$$E_c / E_{(28)} = 0.21 \log_{10} t_e + 0.68 \quad (1.4 < t_e \leq 41 \text{ の場合}) \quad (3-6)$$

本研究では、対象構造物43例の全ての解析において上式を弾性係数評価式として用いた。なお、 $t_e \leq 0.7$ の場合は、式 (3-5) に直線を外挿して推定した。

つぎに、ポアソン比 ν については、全ての解析において $\nu = 0.16$ とした。さらに、熱膨張係数 α についても、骨材岩質あるいは材令により $4 \sim 15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度の範囲で変動するとの報告例⁽²⁴⁾もあるが、本研究では現在、一般的に行われているように⁽²⁵⁾ 熱膨張係数を $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ (一定) と仮定した。

(2) 解析手法

温度応力解析は2次元および3次元の有限要素法を用いた。有限要素法による温度応力解析の定式化は関連の図書⁽⁸⁾にゆずることにし、ここでは説明を省略する。

温度応力解析で用いた有限要素は温度解析と同じ図3-2, 3-3に示す8節点6面体および4角形複合要素である。要素の変位関数も式 (3-2) と同形のものを採用した。

3. 2. 3 温度応力のクリープ解析

温度応力のクリープ解析は、現在、一般的に採用されている有限要素法を用いた初期ひずみ法を適用した。以下にクリープ解析で用いたクリープ関数ならびに解析手法の概要を述べる。

(1) クリープ関数

マスコンクリートのクリープを評価する場合、載荷時材令、温度、湿度あるいは部材の寸法などの影響を考慮することが望ましい。

現在までに提案されている多くのクリープ評価式のうち上記の因子が考慮されている代表的なものに、CEB-FIP提案式⁽²⁶⁾、ACI提案式⁽²⁷⁾およびBazantらの提案式⁽²⁸⁾がある。このうち、CEB-FIP式は温度応力解析への導入が比較的容易であるなどの理由から、多くの研究者により温度応力のクリープ解析に適用されている⁽²⁹⁾。このような温度応力のクリープ解析の研究の動向を考慮して、クリープ関数としてCEB-FIP提案式を用いることにした。

CEB-FIP提案式は、クリープ係数を初期急速ひずみ ε_a 、遅延弾性ひずみ ε_d および流動

ひずみ ε_t の3成分の和として与える所に特徴があり、クリープひずみの具体的な評価式は次のような形式となっている。

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \sigma_0 / E_{28} \cdot \varphi(t, t_0) \\ &= \sigma_0 / E_{28} \cdot [\varepsilon_a + \varepsilon_d + \varepsilon_f] \\ &= \sigma_0 / E_{28} \cdot \{ \beta_a(t_0) + \varphi_d \beta_d(t - t_0) + \varphi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \}\end{aligned}\quad (3-7)$$

$$\text{ただし、} \quad \beta_a(t_0) = 0.8 (1 - f_c(t_0) / f_c(\infty)) \quad (3-8)$$

ここで、
 ε : クリープひずみ
 t : 着目する時点の有効材令
 f_c : 圧縮強度
 t_0 : 載荷時の有効材令
 $\varphi(t, t_0)$: クリープ係数
 σ_0 : 載荷応力
 E_{28} : 材令28日の弾性係数

上式において係数 β_a 、 φ_d 、 β_d 、 φ_t および β_f などは、コードでは図表により与えられているが、本研究では解析で便利のように最小二乗法を適用して次のような各係数についての評価式を導いた⁽²²⁾⁽²³⁾。

(a) β_a について

岡田らの研究成果⁽²¹⁾を参考にして、 $f_c(t)$ と $f_{c(28)}$ の関係を次式で表す。

$$f_c(t_0) / f_{c(28)} = 1.01 \log_{10} t_0 + 0.17 \quad (t_0 \leq 1.4 \text{ の場合}) \quad (3-9)$$

$$f_c(t_0) / f_{c(28)} = 0.51 \log_{10} t_0 + 0.24 \quad (1.4 < t_0 \leq 41 \text{ の場合}) \quad (3-10)$$

そして

$$f_{c(\infty)} = 1.45 f_{c(28)} \quad (3-11)$$

と仮定して、式(3-9)、(3-10)を β_a の評価式、式(3-8)に代入すると次式が得られる。

$$\beta_a(t_0) = 0.8(0.88 - 0.70 \log_{10} t_0) \quad (t_0 \leq 1.4 \text{ の場合}) \quad (3-12)$$

$$\beta_a(t_0) = 0.8(0.83 - 0.35 \log_{10} t_0) \quad (1.4 < t_0 \leq 41 \text{ の場合}) \quad (3-13)$$

(b) β_d について

コードで与えられている算定曲線に最小二乗法を適用して、 β_d の評価式として次式を得た。

$$\begin{aligned} \beta_d(t_1) = & 0.2915 + 0.068 \log_{10} t_1 + 0.0552 (\log_{10} t_1)^2 \\ & + 0.0207 (\log_{10} t_1)^3 - 0.0070 (\log_{10} t_1)^4 \end{aligned} \quad (3-14)$$

ただし、 $t_1 = t - t_0$

(c) β_f について

β_d と同様、最小二乗法により次式を決定した。

$$\begin{aligned} \beta_f(t) = & 0.0955 - 0.1877 (\log_{10} t) + 0.7093 (\log_{10} t)^2 - 0.6435 (\log_{10} t)^3 \\ & + 0.2698 (\log_{10} t)^4 - 0.0508 (\log_{10} t)^5 + 0.0035 (\log_{10} t)^6 \end{aligned} \quad (t \geq 3 \text{ の場合}) \quad (3-15)$$

$$\beta_f(t) = 0.0368 \cdot t \quad (t < 3 \text{ の場合}) \quad (3-16)$$

(d) φ_d と φ_f

φ_d と φ_f については、解析対象がマスコンクリートであることを考慮して $\varphi_d = 0.4$, $\varphi_f = 1.12$ とした。

(2) 解析手法

クリープ解析では初期ひずみ法を適用し、各時間刻みにおけるクリープひずみの増分は履歴理論⁽⁸⁾を用い次式により算定した。

$$\Delta \{\varepsilon_c\} = [D_c] \frac{\partial C(t, t')}{\partial t} \cdot \frac{\partial \{\sigma\}}{\partial t'} dt' \quad (3-17)$$

$$\{\varepsilon_c\}^T = [\varepsilon_{cx}, \varepsilon_{cy}, \varepsilon_{cz}, \gamma_{cxy}, \gamma_{cyz}, \gamma_{czx}] \quad (3-18)$$

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}] \quad (3-19)$$

ただし、

$$[D_0] = \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ & & & & 2(1+\nu) & 0 \\ & & & & & 2(1+\nu) \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

ここで、 $\{\varepsilon_c\}$: クリープひずみベクトル
 $\{\sigma\}$: 応力ベクトル
 $[D_0]$: 応力～クリープひずみマトリックス
 $C(t, t')$: クリープ関数
 ν : クリープポアソン比
 t : 有効材令
 t' : 載荷時有効材令

上式において、クリープポアソン比は弾性ポアソン比に等しく0.16と仮定した。

3. 2. 4 温度応力解析精度の検証

温度応力の解析精度は、温度応力解析結果をもとにして行われる温度ひびわれ予測の精度に大きな影響を及ぼす。ここまで、本章で用いた温度応力解析手法ならびに解析諸定数の決定法などを詳細に述べてきたが、ここでは本章で用いた温度応力解析手法の総合的な解析精度の検証を行った結果について述べる。

(1) コンクリートの力学的性質と有効材令

3. 2. 2および3. 2. 3で述べたように、温度応力解析で用いるコンクリートの弾性係数とクリープ特性は有効材令で評価している。そこで、ここではまずコンクリートの弾性係数とクリープ特性を、式(3-5)，(3-6)および式(3-7)～(3-16)のように有効材令で評価した場合の解析結果に及ぼす影響を明らかにし、コンクリートの力学的性質を有効材令で評価することの意義を確認する⁽²²⁾。

解析手法は、熱伝導解析および温度応力解析とも3次元有限要素法を適用し、解析で用いた諸

定数は、3.2.1～3.2.3で示したものをを用いた。解析を行った構造物モデルは、図3-9に示すような基礎コンクリート上に打設された壁体である。解析は、壁厚Dを0.6、1.2および8mの3ケース、また施工時期は夏と冬の2ケースの、計6ケースについて実施した。コンクリートの示方配合は表3-4に示すようなものを設定した。

解析結果のうち、図3-10に夏施工、壁厚D=1.2mの壁体中央部の壁長手方向応力 σ_x の経時変化を示す。図中、実線で示したものはコンクリート弾性係数とクリープ特性を有効材令で評価した場合、一方、破線は有効材令に変えて、単なる材令によって評価した場合である。

図から明らかなように、いずれの材令においても有効材令で評価した場合は、単なる材令による場合よりも大きな温度応力を与えている。そして、壁体においては温度応力が一般的に大きくなる中心部において特にその傾向が顕著であり、両者の差は最大3kgf/cm²程度に達している。その他の解析ケースについても、これとほぼ同様な結果が得られている。

以上の解析結果より、コンクリートの弾性係数およびクリープ特性を有効材令で評価すると温度応力を大きく算定することが明らかとなった。逆に言えば、単なる材令で評価した場合は温度応力を過小に評価する危険性がある。このような結果から、温度応力解析においてコンクリートの弾性係数およびクリープ特性を有効材令で評価することの意義が確認できたと考える。

(2) 温度応力解析精度の検証

温度応力解析精度の検証のため、実構造物を対象とした温度応力解析を行い、各構造物について実施された温度応力実測結果との比較を行った⁽³⁰⁾⁽³¹⁾。解析を行った構造物は、内部拘束が卓越する橋脚柱と、外部拘束が卓越する旧コンクリート上に打設された壁の、計2例のマスコンクリート構造物である。

以下に、各構造物における温度応力測定実験の概要ならびに温度応力解析精度の検証結果を述べる。

(a) 橋脚柱部

橋脚柱部の形状、寸法および各種計器の埋設位置を図3-11に示す。コンクリートの施工時期は2月であり、施工時のコンクリート温度は13℃であった。また、使用型枠は12mmのベニヤ合板で、脱型時期は材令5日であった。コンクリートは、2回に分けて施工され、第一リフトは約6m(柱長の1/2)で、残りは約1ヶ月後に施工された。各種埋設計器による温度応力測定実験は、主として第二リフト部を対象として行われた。施工に用いられたコンクリートの示方配合ならびに材令28日における力学的性質を表3-5、3-6に示す。また、図3-12は、有限要素法による温度応力解析で用いた橋脚柱の要素分割図である。なお、図3-11で示した各種計器のうち、中央表面の有効応力計C₈は、柱軸方向(鉛直方向)に設置したものである。

図3-13に測点 T_4 、 T_{14} （中央中心と表面）におけるコンクリート温度の実測値と解析値を示す。図から、実測によると橋脚柱中心の温度は、材令4日前後で54℃の最大値を示す。実測値と解析値とを比較すると、中心、表面とも解析値は実測値にくらべ最大4℃程度小さな値を与えているが、定性的には両者は良く合致している。

図3-14～3-16に測点 C_7 （中央表面）、 C_4 （中央中心）および C_8 （表面鉛直方向）におけるコンクリート温度応力実測値ならびに解析値を示す。各図から、橋脚柱に発生する温度応力は、内部拘束が卓越する場合の一般的傾向を示しており、表面では材令初期に引張応力が最大となった後、次第に圧縮応力へと移行していく。一方、中心では逆に、圧縮応力が最大となった後、引張応力へ変化していく傾向を示している。

図3-14から、中央表面では材令6～7日で引張応力が最大値13.4kgf/cm²（実測値）を示している。その後、材令10日付近で圧縮応力へ移行している。実測値と解析値とを比較すると、両者は最大引張応力発生時期まではよく合致しており、温度ひびわれ危険度評価において重要となる最大引張応力についての両者の差異は、3kgf/cm²程度である。しかし、最大引張応力発生時期を過ぎると両者の差異が次第に大きくなる傾向が認められる。

図3-15から、中央中心では材令6日付近で圧縮応力が21.0kgf/cm²（実測値）の最大値を示した後、次第に引張応力へと移行していく。実測値と計算値とを比較すると、最大圧縮応力について8kgf/cm²程度の差異を生じている。

図3-16から、中央表面鉛直方向応力は、同位置の水平方向応力と同様の傾向を示し、材令6日付近で引張応力が12.0kgf/cm²（実測値）の最大値を示す。最大引張応力についての実測値と計算値との対応は良好で、両者の差異は1kgf/cm²程度にすぎない。

（b）壁体

図3-17に、壁体の形状、寸法および各種計器の埋設位置を示す。解析を行った壁体は、旧コンクリート壁体（拘束体）上に打設された壁体である。コンクリートの施工時期は6月で、施工時のコンクリート温度は25℃であった。また、使用型枠は12mmのベニヤ合板で、型枠脱型は材令5日であった。表3-7、3-8に、施工に用いたコンクリートの示方配合と材令28日における力学的性質を示す。

図3-18に、測点 C_1 、 C_2 （壁中心と表面）におけるコンクリート温度の実測値と解析値を示す。図から、壁中心の温度は材令1～2日で最大52℃（実測値）を示し、その後、材令6～7日でほぼ定常状態に達する。実測値と解析値とは、中心、表面とも定性的によく合致しており、定量的にも両者の差は3℃以内に収まっている。

図3-19に、測点 A_1 （壁中心）における温度応力の実測値ならびに解析値を示す。図から、壁体に発生する温度応力は、外部拘束が卓越する場合の典型的な傾向を示しており、材令初期に

中心で圧縮応力が最大となった後、温度降下とともに次第に引張応力へと移行していく。そして、温度が定常状態になる時期に引張応力が最大となっている。実測によると、材令1～2日の圧縮応力の最大値は約6kgf/cm²、また材令6～7日以降の引張応力の最大値は9～12kg/cm²程度の値となっている。

実測値と解析値との対応に注目すると、両者は定性的にはよく合致しているが最大引張応力については4～5kgf/cm²程度の差異が認められる。

以上、橋脚柱と壁体についての温度応力の実測値と解析値との比較から、本章で用いる温度応力解析手法の精度の検証を試みた。その結果、各図に示したように、温度応力解析の前段となる温度解析精度については、実測値との差が中心、表面とも3～4℃以内に収まることが確認された。一方、温度応力解析精度については、温度ひびわれ危険度評価において特に重要となる最大引張応力については、実測値との差が3～5kgf/cm²程度になることが明らかとなった。

3. 2. 5 温度ひびわれ危険度評価

温度ひびわれ危険度の指標となるひびわれ危険指数として、本研究では応力と強度による指数、ひずみとひずみ能力による指数、土木学会規定の指数（温度ひびわれ指数）および温度上昇特性のみから算定した簡略的な指数など、合計4種類の指数を取り上げ、各指数と温度ひびわれとの対応ならびに各指数の適用性など種々検討を行った⁽²³⁾⁽³²⁾。

(1) 温度上昇特性にもとづく危険指数

温度応力は、基本的には温度ひずみの拘束により発生するものであるが、その拘束効果は内部拘束と外部拘束に大別される。このうち、内部拘束が卓越する場合は構造物の内部と表面との温度差が、一方、外部拘束が卓越する場合は構造物の平均的な温度降下量が温度ひびわれ発生の主な要因となる。ただし、実際的にはこれら温度に関する要因の他に、拘束度、あるいはコンクリートの強度、弾性係数などの要因も温度ひびわれに大きく影響する⁽³³⁾が、本研究では温度上昇特性にもとづく指数として、構造物の中心と表面の温度差および平均温度降下量のみからなる簡易的な指数を考えた。

(2) 応力と強度にもとづく危険指数

本研究では、応力と強度にもとづく危険指数を、着目する部分の材令 τ における引張主応力 σ (τ) とコンクリートの引張強度 σ_t (τ) との比として定義した。
すなわち、

$$\text{応力と強度にもとづく危険指数 } I_1 = \frac{\sigma_p(\tau)}{\sigma_t(\tau)} \quad (3-21)$$

上式での、コンクリートの材令 τ における引張強度は、弾性係数評価式 式(3-3)，(3-4)あるいは、圧縮強度評価式 式(3-9)，(3-10)と同様、岡田らの研究成果⁽²¹⁾をもとにした次式により算定した。

$$\sigma_t(\tau) / \sigma_{t(28)} = 1.29 \log_{10} \tau' + 0.26 \quad (0.7 \leq \tau' < 1.4 \text{ の場合}) \quad (3-22)$$

$$\sigma_t(\tau) / \sigma_{t(28)} = 0.45 \log_{10} \tau' + 0.36 \quad (1.4 \leq \tau' < 41 \text{ の場合}) \quad (3-23)$$

ここで、 τ' ：材令 τ における有効材令(日)

$\sigma_{t(28)}$ ：標準養生下、材令28日での引張強度

そして、本研究では、 $I_1 \geq 1$ をひびわれ発生域、 $I_1 < 1$ を安全域と考え、指数 I_1 とひびわれ発生との対応を検討した。

(3) ひずみとひずみ能力にもとづく危険指数

本研究では、ひずみとひずみ能力にもとづく危険指数を、着目する部分の材令 τ における引張主ひずみ $\varepsilon_p(\tau)$ とコンクリートの引張ひずみ能力 $\varepsilon_t(\tau)$ との比として定義した。

すなわち、

$$\text{ひずみとひずみ能力にもとづく危険指数 } I_2 = \frac{\varepsilon_p(\tau)}{\varepsilon_t(\tau)} \quad (3-24)$$

上式におけるコンクリートのひずみ能力 $\varepsilon_t(\tau)$ に関しては、Houghton⁽³⁴⁾あるいはLiu⁽³⁵⁾らがそれぞれ評価式を提案している。このうち、Houghton は、コンクリートの引張ひずみ能力を弾性ひずみ能力とクリープひずみ能力の和と考え、その評価式として次式を与えている。

$$\varepsilon_t(\tau) = \frac{f(\tau)}{E(\tau)} + (f(\tau_0) + f(\tau)) \cdot \frac{\varepsilon(\tau, \tau_0)}{2} \quad (3-25)$$

ここで、 τ_0 ：載荷時材令

$f(\tau)$ ：曲げ強度

$E(\tau)$: 圧縮弾性係数

$\varepsilon(\tau, \tau_0)$: 材令 τ における単位クリープひずみ

本研究では、Houghton 式に修正を加えた次の2式によりコンクリートの引張ひずみ能力を算定した。

$$\varepsilon_{t1}(\tau) = \frac{\sigma_B(\tau')}{E(\tau')} + \sum_{i=1}^k \Delta\sigma_B(\tau_i') / E_{(28)} \cdot \varphi(\tau', \tau_i') \quad (\tau_k' < \tau') \quad (3-26)$$

および、

$$\varepsilon_{t2}(\tau) = \frac{\sigma_t(\tau')}{E(\tau')} + \sum_{i=1}^k \Delta\sigma_t(\tau_i') / E_{(28)} \cdot \varphi(\tau', \tau_i') \quad (\tau_k' < \tau') \quad (3-27)$$

ここで、 $\sigma_B(\tau')$, $\sigma_t(\tau')$: 有効材令 τ' で算定した材令 τ における曲げおよび引張強度

$E(\tau')$: 有効材令 τ で算定した材令 τ における圧縮弾性係数

$E_{(28)}$: 材令28日における圧縮弾性係数

$\Delta\sigma_{B(i)}$, $\Delta\sigma_{t(i)}$: 期間 $\tau_i \sim \tau_{i+1}$ における強度増分

$\varphi(\tau', \tau_i')$: 式3-7, 3-8で示した CEB-FIP 提案式を用いて算定したクリープ係数

さて、式(3-25)の Houghton の提案式は、引張域に対してクリープひずみに関する線形則、Davis-Granville の法則を破壊応力のレベルまで拡張したものと解釈することができる。一方、本研究における提案式も基本的な考え方は同様であるが、材令の進行に伴う強度とクリープ係数の変化をより合理的に考慮できるよう、クリープひずみについて重ね合わせの原理を適用して Houghton 式に修正を加えたものである。2つの評価式のうち、式(3-26)は引張ひずみ能力算定の基礎となるコンクリート強度に、Houghton 式と同様、曲げ強度を、一方、式(3-27)は引張強度を用いたものである。なお、各材令における曲げ強度の算定にあたっては圧縮強度から推定する方法をとり、その際の変換式は次の CEB 提案式⁽³⁶⁾を用いた。

$$\sigma_B = 0.789\sqrt{\sigma_c} \quad (3-28)$$

ここで、 σ_B : 曲げ強度 (MPa)
 σ_c : 圧縮強度 (MPa)

式 (3-26), (3-27) を式 (3-24) に用いると、2つのひびわれ危険指数が得られるが、本研究では、式 (3-26) を用いて得られた指数を I_{2A} とし、

$$I_{2A} = \frac{\varepsilon_{p1}(\tau)}{\varepsilon_{t1}(\tau)} = 1 \quad (3-29)$$

をひびわれ発生線 (以下、これを A Line と称する) と考えた。一方、式 (3-27) を用いた場合を I_{2B} と定義し、

$$I_{2B} = \frac{\varepsilon_{p2}(\tau)}{\varepsilon_{t2}(\tau)} = 1 \quad (3-30)$$

をひびわれ発生限界線 (以下、これを B Line と称する) と考えた。そして、指数 I_{2A} が A Line を越える領域をひびわれ発生域、指数 I_{2A} が A Line 以下でかつ指数 I_{2B} が B Line 以上の領域をひびわれ危険域、そして、指数 I_{2B} が B Line 以下の領域を安全域と考え各指数の値とひびわれ発生との対応を検討した。

(4) 土木学会コンクリート標準示方書規定の危険指数 (温度ひびわれ指数)

昭和61年度版土木学会コンクリート標準示方書では次式により温度ひびわれ危険指数を定義し、既往の研究成果⁽⁷⁾⁽³²⁾⁽³⁷⁾による温度ひびわれ指数とひびわれ発生確率との関係を参考にして、構造物の重要度、機能、環境条件に応じて指数の値を適切な範囲内におさめるよう推奨している。

$$\text{温度ひびわれ指数} = \frac{f_t}{\sigma_r} \quad (3-31)$$

ただし、 σ_r : 水和熱に起因して生じた部材内での最大温度応力
 f_t : σ_r を算定した時点におけるコンクリートの引張強度で材令および養生温度を考慮して求める

また、温度ひびわれ指数は簡易的に次のように温度から求めてもよいとしている。すなわち、

内部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひびわれ指数} = \frac{15}{\Delta T_i} \quad (3-32)$$

外部拘束が卓越する場合

$$\text{温度ひびわれ指数} = \frac{10}{R \cdot \Delta T_0} \quad (3-33)$$

ただし、 ΔT_i ：最高温度時の内外の温度差（℃）

ΔT_0 ：部材平均最高温度と外気温平衡時温度との差（℃）

R ：外部拘束度であり、比較的柔らかい岩盤の場合には0.5、硬い岩盤の場合には0.8を用いる。既設のコンクリート上に打設する場合、一般には0.6としてよい。

一方、温度ひびわれ発生に対する指数の標準的な値として次のようなものを与えている。

ひびわれを防止したい場合	1.5以上
ひびわれの発生は許すが幅および数を制限したい場合	1.2～1.4
その他	0.7～1.1

ここで、式（3-31）で表される温度ひびわれ指数は、（2）で定義したひびわれ危険指数 I_i の逆数となっており、両者は本質的には同じものと考えられる。本研究では、ひびわれ危険指数 I_i を温度ひびわれ指数に換算することにより、温度ひびわれ指数の値と温度ひびわれ発生の対応を検討した。さらに、温度解析結果から、式（3-32）、（3-33）を用いて簡略的に温度ひびわれ指数を算出した場合についても同様の検討を行った。

3.3 解析対象構造物

コンクリート構造物における温度応力は、その発生機構により内部拘束が卓越する場合と外部拘束が卓越する場合の2ケースに大別される。本研究で解析を行った構造物は、柱、フーチング、

はりなど内部拘束が卓越するもの17例と、外部拘束が卓越する壁、スラブなど26例の合計43例である。これらの構造物に関する施工あるいは実験データは、筆者が実施した現場測定実験データ^{(38) (39)}（未発表資料を含む）、著者が入手した2つの現場における計測データ^{(39) (40)}、小野らの現場測定実験データ⁽³³⁾、Hansenの実物大模型実験データ⁽⁴¹⁾、辻らの実物大模型実験データ⁽⁴²⁾、崎本らの現場測定実験データ⁽⁴³⁾、巢本らの現場測定実験データ⁽³¹⁾、および横山の現場測定実験データ⁽⁴⁴⁾から成っており、Hansen によるデータ（9件）を除けば、わが国においては一般的なマッシュパなコンクリート構造物を対象として得られたものである。各構造物の寸法、コンクリートの配合と力学的性質、ひびわれ発生の有無ならびにその他の施工条件などをまとめて表3-9に示す。

3.4 温度ひびわれ予測結果および考察

3.4.1 マスコンクリートにおける温度ひびわれの危険性

温度応力ならびに温度ひびわれ予測結果のうち、図3-20～3-21に内部拘束が卓越するNo.1構造物（表3-9参照）と外部拘束が卓越するNo.23構造物（表3-9参照）におけるひびわれ危険指数 I_1 、 I_{2A} および I_{2B} の経時変化を示す。これら指数の値は、各構造物において温度応力が最大となる箇所について算出したものであり、一般に内部拘束が卓越する場合は表面部、一方、外部拘束が卓越する場合は中心部における値である。図3-20から、内部拘束が卓越するNo.1構造物においては、材令初期（温度が最大となる時期）に指数の値がピークとなり温度ひびわれの危険性が增大する。各指数のピーク値は、 $I_1=0.46$ で応力と強度によるひびわれ発生線（ $I_1=1$ ）以下となっている。一方、ひずみとひずみ能力による指数は、 $I_{2A}=0.55$ 、 $I_{2B}=1.26$ で、ひびわれ発生線 A Line（ $I_{2A}=1$ ）以下かつひびわれ安全限界線 B Line（ $I_{2B}=1$ ）以上のひびわれ危険域にある。温度下降期に移ると、各指数の値は単調に減少していきひびわれの危険性が減少していくことを示している。例えば、指数 I_{2B} は、材令4～5日で $I_{2B}<1$ となりひびわれ安全限界線以下になる。なお、図中において、材令6日付近で指数が一時的に増大するが、これは型枠脱型の影響である。

つぎに、図3-21から、外部拘束が卓越するNo.23構造物においては、温度上昇期をすぎて温度降下期に移ると、指数の値が次第に大きくなりひびわれの危険が増大していく。

指数 I_1 は、材令3日前後で $I_1>1$ となり、材令6日以降も $I_1=1.5\sim 1.7$ のほぼ一定した値を保っている。一方、指数 I_{2A} も材令2～3日で $I_{2A}>1$ となり、A Line 以上のひびわれ発生域の値を示す。そして、材令5日以降は $I_{2A}=2.0\sim 2.1$ 程度のほぼ一定した値を保っている。

3. 4. 2 各種ひびわれ危険指数による危険度評価とそのばらつき

(1) 温度上昇特性にもとづく危険指数

各構造物に対する温度解析結果より算定したコンクリート打設後の中心最大温度、中心と表面の最大温度差、ならびに外部拘束が卓越する構造物における部材の平均温度降下量をまとめて表 3-10 に示す。なお、部材の平均温度降下量は、部材平均最大温度から外気温平衡温度を差し引くことにより算出したものである。

さて、前述のように温度応力は内部拘束に起因するものと外部拘束に起因するものに大別されるが、前者においては中心と表面の温度差が温度ひびわれに対する主な要因であり、一方、後者においては構造物の平均温度降下量が大きな影響を及ぼす。そこで、内部拘束が卓越する構造物 (No.1~No.17) において、ひびわれが発生したもの (以下、ひびわれ有と呼ぶ) と発生しなかったもの (以下、ひびわれ無と呼ぶ) とにおける中心と表面の最大温度差を比較すると、ひびわれ有の平均は41.6℃、一方、ひびわれ無の平均は28.0℃ となっており、ひびわれ有が無の約1.5倍の値を示している。同様に、外部拘束が卓越する構造物 (No.18~No.43) において平均温度降下量に注目すると、ひびわれ有では平均28.2℃、一方、ひびわれ無では平均19.9℃となっており、ひびわれ有がひびわれ無の約1.4倍の値を示している。図 3-22 は、内部拘束が卓越する構造物について、ひびわれ有と無の場合における中心と表面の最大温度差の分布を、また、図 3-23 は、外部拘束が卓越する構造物について、ひびわれ有と無における平均温度降下量の分布をそれぞれ示したものである。図 3-22 から、内部拘束が卓越する場合、ひびわれ有における最大温度差の範囲は28.7~54.6℃、一方、ひびわれ無では12.1~39.3℃の範囲にある。すなわち、ひびわれ有と無とが混在する最大温度差の範囲は28.7~39.3℃で、この範囲以上では全ての例においてひびわれが発生しており、反対にこの範囲以下ではひびわれの発生は認められていない。図 3-23 から、外部拘束が卓越する場合、ひびわれ有における平均温度降下量の分布は15.3~38.2℃で、ひびわれ無では9.1~26.7℃となっている。すなわち、ひびわれ有と無が混在する平均温度降下量の範囲は15.3~26.7℃で、これ以上では全ての例においてひびわれが発生し、反対に、これ以下ではひびわれの発生は認められていない。温度応力に影響を及ぼす要因は、構造物の温度上昇特性の他に、コンクリートの物性、外部拘束度さらには施工条件など数多くを上げることが出来るが、ここで得られた結果から、最大温度差ならびに平均温度降下量のいずれもが、ひびわれ発生の重要な要因となっており、これらにより温度ひびわれの危険度を概略的に判断することが可能であると考えられる。

(2) 応力と強度にもとづく危険指数

図 3-24 に、各構造物のひびわれ危険指数 I_1 の最大値の分布を示す。ひびわれ発生有の指

数の範囲は0.65～2.04で、指数の値が $I_1 \leq 1$ の場合でも7例においてひびわれが発生している。そして、その中でも小さな指数を示したものは、No.18構造物の0.65およびNo.4構造物の0.66であり、従って、ひびわれ発生有における実際上の指数の下限は0.6程度の値と考えられる。

つぎに、ひびわれ無における指数の範囲は0.19～1.25で大部分が $I_1 < 1$ の値をとるが、 $I_1 \geq 1$ でもひびわれが発生しなかった例が2件あった。指数の上限は1.25（構造物No.13）であった。以上のようなひびわれ発生有と無の例におけるひびわれ危険指数 I_1 の分布から、ひびわれ発生線（ $I_1 = 1$ ）を基準にして、 $0.6 < I_1 < 1.2$ の範囲がひびわれ有と無の例が混在する領域、そしてこの範囲外、すなわち指数の値が $I_1 \geq 1.2$ の場合はひびわれ発生の可能性が高く、反対に $I_1 \leq 0.6$ の場合はひびわれの危険性は低いと判断するのが妥当であると考えられる。

（３）ひずみとひずみ能力にもとづく危険指数

図3-25に、ひずみとひずみ能力による指数のうち、引張ひずみ能力の算定式に式（3-26）を用いた時の指数 I_{2A} の分布を示す。前述のように、本研究では、 $I_{2A} = 1$ をひびわれ発生線（A Line）とし、 $I_{2A} \geq 1$ の領域をひびわれ発生域と考えた。図から、ひびわれ発生有における指数の範囲は0.49～2.36で、 $I_{2A} < 1$ の場合（ひびわれ危険域および安全域）でもひびわれは発生している。一方、ひびわれ無における指数の範囲は0.04～1.15であり、 $I_{2A} \geq 1$ の値を示しながらひびわれが発生しなかった例が2件（構造物No.13, No.22）あった。しかし、この2例における指数 I_{2A} の値はともに1に近い値を示しており、従って、 $I_{2A} = 1$ のA Lineをひびわれ発生線、すなわち、ひびわれ発生無の上界線と仮定しても大きな誤りはないものと考えられる。

つぎに、図3-26は、ひずみ能力算定式に式（3-27）を用いた時の指数 I_{2B} の分布である。本研究では、前述のように、 $I_{2B} = 1$ の線（B Line）以下をひびわれ安全域と考えた。図から、ひびわれ無における指数の範囲は0.08～2.73であり、B Line以上（ひびわれ危険域および発生域）でもひびわれが発生無のものが多数ある。一方、ひびわれ発生有における指数の範囲は0.99～4.42で、大部分が1以上の値をとっている。構造物No.18, No.20の2例においては指数がともに0.99で1より小さな値となる。しかし、その差は極めて僅かであり、実用上は $I_{2B} \leq 1$ をひびわれ安全域、すなわち、 $I_{2B} = 1$ （B Line）をひびわれ発生有の下限としても実用上は差しつかえないと考えられる。

（４）土木学会コンクリート標準示方書規定の危険指数（温度ひびわれ指数）

図3-27に、有限要素法による応力解析結果を用いて算出した各構造物の温度ひびわれ指数の分布を示す。

ひびわれ発生有の指数の範囲は0.49（構造物No.40）～1.54（構造物No.18）であり、一方、ひびわれ無における指数の範囲は0.80（構造物No.13）～5.26（構造物No.43）である。すなわち、

ひびわれ発生有と無の例が混在する指数の範囲は0.80～1.54で、指数が0.80より下では全ての例においてひびわれが発生しており、一方、指数が1.54以上になるとひびわれは生じていない。

示方書ではひびわれを防止したい場合の指数の値として1.5以上を与えているが、本研究の結果からもこの値は妥当なものと考えられる。

つぎに、図3-28に、土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、式(3-32)，(3-33)を用いて温度から簡易的に算出した場合の指数の分布を示す。ひびわれ発生有の指数の範囲は0.30(構造物No.6)～1.09(構造物No.30)であり、一方、ひびわれ無では0.41(構造物No.3)～1.83(構造物No.13, No.14, No.42)である。応力解析結果から求めた指数の値と比較すると、簡易的に求めた指数の値は全般的に小さくなる傾向にあり、特にひびわれ発生無において大きな差異を生じている。また、各指数の相対的な大小関係も両者は必ずしも一致はしていない。簡易的に指数を求めた場合の、ひびわれ発生有における指数の上限は1.09で、ひびわれを防止したい場合の指数の標準値とは一応の対応は認められる。しかし、図3-28に示されるように、指数の値が0.41～1.09の間にひびわれ発生有と無の例の大半が集中しており、指数の値とひびわれ発生との対応は必ずしも明確とはなっていない。

3.4.3 各種危険指数の適用性の評価

前節においては、温度ひびわれ危険度に関する各指数の分布の範囲を明らかにした。ひびわれ発生有と無との混在は、材料特性のばらつきなど解析上避け得ない要因に加えて、温度ならびに温度応力の解析精度、さらには、指数の算出法もしくはその物理的な妥当性など解析上の要因にも起因すると考えられる。従って、ひびわれ発生有と無とが混在する程度により、その指数の適用性を検討することが可能であると考えられる。すなわち、指数の混在が少なければ少ないほど、指数の値をもとにしてひびわれ発生に対してよりの確な評価ができるのである。本研究では、ひびわれ発生有と無との指数が混在する範囲にある指数の、全指数(46例)に対する比率(ここでは、これを混在比率とよぶことにする)により、各指数の適用性を検討した。なお、最大温度差と平均温度降下量については、両者を一括して取り扱った。また、簡易的に算出した温度ひびわれ指数については、ひびわれ発生例中、指数が最も大きな値を示している1例は、特異例として計算から除外した(図3-28参照)。表3-11に、各指数の混在比率を示す。表3-11から、混在比率が最も小さな値を示したのは、応力と強度による指数 I_1 ならびに土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、応力解析をもとに算出した指数の41%であり、次いで、ひずみとひずみ能力による指数 I_{2R} 、 I_{2B} ならびに最大温度差および平均温度降下量の51%、そして、混在比率が最も大きくなったのは、土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、簡易的に算出した場合で、値は73%となった。このような結果と、指数の一般性ならびに算出にあたっての計算量などから、

本研究の範囲内では、応力と強度による指数が現段階では最も適用性が高いと判断される。つぎに、ひずみとひずみ能力による指数については、ひびわれ発生条件としては合理的なものと考えられるが、混在比率は応力と強度による指数にくらべやや大きな値を示した。この原因としては、ひずみ能力の評価がいまだ十分ではないことが考えられ、今後さらに研究が必要である。しかし、温度ひびわれ危険度評価における補助的な指数としては、現状でも十分適用が可能であると考えられる。最大温度差ならびに平均温度降下量については、混在比率自体は51%でひずみとひずみ能力による指数と同程度となり、簡略的な温度ひびわれ評価法として高い実用性を有するものと考えられるが、その適用範囲に留意する必要がある。すなわち、本研究で用いた最大温度差および平均温度降下量のみによる指数は、力学的要因を全く含まないので、ここで対象とした一般的な構造物以外のものに対して、ここでの結果を適用する場合は十分な注意が必要と考えられるのである。最後に、温度から算出した土木学会規定の温度ひびわれ指数は、本研究の範囲内では最も大きな混在比率を示した。本方法は、温度上昇特性に加えて、拘束度という力学的要因も考慮されており、その実用的意義は大きいものと考えられるが、現段階では拘束度の評価および式中の定数の値の妥当性について、なお多くの検討が必要である。

3. 5 まとめ

本章では、43例のマスコンクリート構造物に対する有限要素法による温度ならびに温度応力解析結果から4種類の温度ひびわれの危険指数を算出し、これらの指数と温度ひびわれ発生との対応ならびに各指数の適用性などを明らかにした。さらに本章では、各指数算出の基礎となる温度および温度応力解析で用いる解析諸定数の評価法、ならびに各解析手法の精度の検討も合わせて行った。これらの検討結果も含めて本章で得られた結論を要約すれば次のようになる。

(1) 温度解析について

1. 温度解析で用いるコンクリートの熱伝導率および比熱の値は、それぞれの一般的な変動範囲における中央値、すなわち、熱伝導率については $2.35\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ 、比熱については $0.24\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ と仮定しても実用上十分な精度が得られる。
2. コンクリートの発熱量は、実用的には資料の比較的蓄積の豊富な断熱温度上昇特性を用いるのが適当である。
3. 熱伝達率については、コンクリート表面では $10.0\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、合板型枠面では $12.0\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、また鋼製型枠面では $12.0\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 程度とするのが適当である。
4. 本章で用いた温度解析手法の精度は、実測値との差において構造物の中心、表面ともに $3\sim 4^\circ\text{C}$ 以内に収まった。

(2) 温度応力解析について

1. マスコンクリートの温度応力解析ではコンクリートの弾性係数およびクリープ係数を有効材令で評価するのが適当である。
2. コンクリートの弾性係数とクリープ特性を単なる材令で評価した場合、温度応力を過少に評価する危険性がある。
3. 弾性係数の評価式として、岡田らの研究成果から導いた式(3-6)、(3-7)を、またクリープ特性評価式として、CEB-FIP提案式を基本とした式(3-7)～(3-16)を用いた場合温度応力解析の精度は、実測値との差において3～5kgf/cm²程度になる。

(3) 温度ひびわれ危険度評価について

1. 構造物の最大温度差および平均温度降下量に注目して温度ひびわれを検討した結果、内部拘束が卓越する場合は中心と表面の最大温度差の平均が、一方、外部拘束が卓越する場合は平均温度降下量の平均が、それぞれ、ひびわれ発生有ではひびわれ無の1.4～1.5倍程度の大きさになっており、これらが温度ひびわれ発生の重要な要因となっていることが確認された。
2. 温度応力と引張強度の比をひびわれ危険指数 I_1 と定義し、指数 I_1 とひびわれ発生との対応を検討した結果、 $0.6 < I_1 < 1.2$ の範囲がひびわれ発生有と無の例が混在する領域で、 $I_1 \geq 1.2$ の場合はひびわれの発生の可能性が高く、反対に $I_1 \leq 0.6$ の場合はひびわれの危険性が低いことが明らかとなった。
3. ひずみと引張ひずみ能力の比から、ひびわれ危険指数 I_{2A} 、 I_{2B} を定義し、 $I_{2A} = 1$ をひびわれ発生線（ひびわれ発生無の上界線）、 $I_{2B} = 1$ をひびわれ発生限界線（ひびわれ発生の下界線）と考え、 $I_{2A} \geq 1$ をひびわれ発生域、 $I_{2A} < 1$ かつ $I_{2B} > 1$ をひびわれ危険域、そして、 $I_{2B} \leq 1$ を安全域としてひびわれ発生有と無の例における指数 I_{2A} と I_{2B} の分布と各領域との関係を検討した結果、両者は良好に対応していることが明らかとなった。
4. 有限要素法による応力解析結果を用いて算出した土木学会コンクリート標準示方書規定の温度ひびわれ指数は、ひびわれ発生有では0.49～1.54、ひびわれ発生無では0.80～5.26の範囲の値となった。すなわち、指数の値が1.54以上ではひびわれは生じておらず、示方書で示されている温度ひびわれ防止レベルに対する指数の標準値とよい対応を示した。一方、温度解析結果から簡易的に算出した温度ひびわれ指数は、ひびわれ発生有では0.30～1.09、ひびわれ無では0.41～1.83となった。すなわち、ひびわれ発生有の指数の上限は1.09で、ひびわれ防止の指数標準値と一応の対応が認められた。しかし、指数の値とひびわれ発生との対応は、必ずしも良好な結果とはならなかった。
5. ひびわれ発生有と無が混在する範囲にある指数の、全指数に対する比率を混在比率とし、こ

れをもとに各指数の適用性を検討した結果、応力と強度による指数の混在比率が一番小さく、現段階では最も適用性に優れていると考えられた。土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、簡易的に算出した場合は、混在比率が74%と最も大きな値を示した。このことより、指数の簡易算定式中の拘束度の評価ならびに定数の値について、さらに多くの検討が必要であると考えられた。

(参考文献)

- (1) 小野 定, 櫛田康仁: 温度応力解析方法に関する既往の研究成果について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 75~82, 1982
- (2) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書: 外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案, 日本コンクリート工学協会, pp. 47~98, 1985
- (3) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書: マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム, 日本コンクリート工学協会, 1985
- (4) たとえば, 塚山隆一: マッシブな鉄筋コンクリート構造物の温度ひびわれ発生条件, セメント技術年報XXXI, pp. 433~436, 1977
- (5) 小野 定: マスコンクリートの温度ひびわれ発生有無の評価手法に関する研究, 土木学会第36回年次学術講演会概要集, pp. 51~52, 1981
- (6) 森永 繁, 桑原隆司: マスコンクリートの温度応力によるひびわれ発生条件とひびわれ発生危険性評価方法, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 61~68, 1982
- (7) 吉岡保彦, 両角昌公, 渡辺克次: マスコンクリートのひびわれ予測システムの開発とその適用例, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 29~34, 1984
- (8) たとえば, O.C. ツインキーウ・イツ (吉識 雅夫, 山田嘉昭監訳): マトリックス有限要素法, 培風館, 1975
- (9) 塚山隆一: コンクリートの断熱温度上昇推定, セメント技術年報, Vol. 30, pp. 408~410, 昭和51年
- (10) 田沢栄一, 松岡康訓: マスコンクリートの施工法, 大成建設技術報告238号, 1976
- (11) 小柳 洽, 森本博昭: コンクリート構造物の熱伝導解析についての二, 三の考察, 岐阜大学工学部研究報告, 31号, pp. 135~144, 1981
- (12) R. F. Blanks: Boulder Dam Cement and Concrete Studies, Engineering News-Record,

- 22, pp. 648~651, 1934
- (13) L. J. Mitchell: Thermal Properties of Hardened Concrete, ASTM ; STP169, pp. 129~135, 1956
- (14) 徳田 弘, 伊藤 勉: コンクリートの熱拡散率・熱伝導率および比熱について, 電力中央研究所技術研究所報告, 土木・63014, 1964
- (15) 徳田 弘, 庄谷征美: コンクリートの熱特性値の測定と二・三の考察, 土木学会論文報告集, 第212号, pp. 89~98, 1973
- (16) 青柳征夫: 発電用原子炉構造物へのプレストレストコンクリートの適用に関する研究, 電力中央研究所技術研究所報告, 土木・67037, 1967
- (17) 山川秀次, 笠原 清, 小林精一: マスコンクリートの熱伝達率試験方法の検討, 土木学会第37回年次学術講演会概要集, pp. 415~416, 1982
- (18) 小野 定: マスコンクリート打ち込み後の温度上昇に関する二・三の考察, コンクリート工学, Vol. 15, No. 1, pp. 42~50, 1977
- (19) 洪 悦郎: コンクリートの強度推定実用法とその応用, セメント技術年報XⅢ, pp. 244~249, 1959
- (20) H. S. Lew and T. W. Reichard: Mechanical Properties of Concrete at Early Ages, ACI Jour. , Proc. , Vol. 75, No. 10, pp. 533~542, 1978
- (21) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘: マスコンクリートの基本的特性に関する一考察, セメント技術年報, Vol. 34, pp. 230~233, 昭和55年
- (22) 森本博昭, 小柳 治: コンクリート構造物の温度応力解析における2・3の問題点, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 69~74, 1982
- (23) 森本博昭, 小柳 治: コンクリート構造物の温度ひびわれ予測に関する研究, 土木工学論文報告集第338号, pp. 197~206, 1983
- (24) たとえば、川口 徹, コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2, 日本コンクリート工学協会, pp. 15~18, 1982
- (25) たとえば、マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書: マスコンクリートの温度応力推定法に関する既往の研究とその総括, 日本コンクリート工学協会, pp. 8~9, 1985
- (26) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structure, 1978
- (27) ACI Committe 209: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, Designing for the Effect of Creep, Shrinkage, Temperature in Concrete Structures, ACI Publication SP 27, pp. 51~58, pp.257~269, 1971

- (28) Bažant, Z. P. and Panula, L. : Practical Predictions of Time-Dependent Deformations of Concrete, Part 1~4, Material and Structures, No. 65, No. 66, 1978, No. 69, 1979
- (29) たとえば、吉岡保彦、米沢敏男：単純拘束モデルによるマスコンクリートに生じる熱応力解析と実験，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C2，日本コンクリート工学協会，pp. 91~96，1982
- (30) 毛利康治，戸田博文，森本博昭，小柳 洽：2、3の方法によるコンクリート壁の温度応力の実測と解析，第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C7，日本コンクリート工学協会，pp. 51~54，1984
- (31) 森本博昭、飯田正幸、巢本利博、小柳 洽：コンクリート橋脚柱の温度応力の実測と解析ならびにひびわれ予測，第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C7，日本コンクリート工学協会，pp. 45~50，1984
- (32) 森本博昭，小柳 洽：コンクリート構造物の温度ひびわれ危険度評価に関する研究，土木学会論文集，第390号/V-8，pp. 67~75，1988
- (33) たとえば、小野 定：マスコンクリートの温度ひびわれ制御対策の研究，第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C7，日本コンクリート工学協会，pp. 21~28，1984
- (34) D.L.Houghton : Determing Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Jour. , Proc. , Vol. 73, No. 12, pp. 691~700, 1976
- (35) Tony. C. Liu, James E. McDonald : Prediction of Tensile Strain Capacity of Muss Concrete, ACI Jour. , Proc. , Vol. 75, No. 5, pp. 192~197, 1978
- (36) Neville, A. M. , 後藤幸正・尾坂芳夫監訳：コンクリートの特性，技報堂，pp. 232~234, 1979
- (37) 大崎幸雄，庄野 昭，杉山 律，河田秋澄：温度ひびわれ発生危険度の簡易評価システムについて，第7回コンクリート工学年次学術講演会論文集，pp. 657~660，1985
- (38) 森本博昭，小柳 洽：コンクリート構造物の温度解析と簡易ひびわれ予測法，土木学会第36回年次学術講演会概要集，pp. 49~50，1981
- (39) 白石基礎工事株式会社：橋台のコンクリートひびわれについての考察，昭和57年
- (40) 阪神高速道路公団：マッシュなコンクリート構造物の温度・乾燥収縮応力およびP C緊張による梁部応力，保全施設部報告書，昭和56年
- (41) Hansen. T. C. : Surface Cracking of Mass Concrete Structures at Early Form Removal , Bull. RILEM, No. 28, pp. 145~153, 1965
- (42) 辻 幸和，横田紀男，渡辺夏也，坂田憲逸，鈴木康範：膨張コンクリートのマスコンク

- リートへの適用に関する研究，セメント技術年報，Vol. 34，pp. 184～187，昭和55年
- (43) 崎木純治，十河茂幸，三浦律彦：水和熱によって発生する鉄筋コンクリート壁体の温度応力について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C2，日本コンクリート工学協会，pp. 105～112，1982
- (44) 横山博司：クリープを考慮した温度応力の検討他，第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，JCI-C7，日本コンクリート工学協会，pp. 41～44，1984

表3-1 単位セメント量 W_c と K , α の関係
(普通ポルトランドセメント)

打込温度 (℃)	断熱温度上昇 T_{ad} の実験定数	
	K (℃)	α (1 h)
5	$0.098W_c + 11.30$	$0.000107W_c - 0.0167$
10	$0.098W_c + 11.30$	$0.000137W_c - 0.01215$
20	$0.091W_c + 11.47$	$0.00019W_c + 0.0045$
30	$0.087W_c + 11.87$	$0.000287W_c + 0.0014$

表 3-2 計算因子

	計 算 因 子	水 準 値	水準数
1	コンクリート熱伝導率 $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}(\text{W/m}^\circ\text{C})$	1.19(1.38), 3.13(3.64) 2.16(2.51)	3
2	コンクリート比熱 $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}(\text{J/kg}^\circ\text{C})$	0.2(840), 0.28(1170) 0.0007 \times T+0.24 (2.9 \times T+1010) 0.0007 \times T+0.19 (2.9 \times T+800) 0.0007 \times T+0.215 (2.9 \times T+900)	5
3	コンクリート打設温度(初期温度) $^\circ\text{C}$	10, 20, 30	3
4	コンクリート断熱温度上昇 $^\circ\text{C}$	打設温度10 $^\circ\text{C}$ 40.70($1-e^{-0.02895t}$) 打設温度20 $^\circ\text{C}$ 38.77($1-e^{-0.06150t}$) 打設温度30 $^\circ\text{C}$ 37.97($1-e^{-0.08750t}$)	3
5	表面の熱伝達率 $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}(\text{W/m}^2^\circ\text{C})$	10(12)	1
6	コンクリート単位体積重量(単位体積質量) kg/m^3	2300	1
7	地中底面既知温度 $^\circ\text{C}$	打設温度と同一	1
8	外気温 $^\circ\text{C}$	打設温度と同一	1
9	地盤初期温度 $^\circ\text{C}$	打設温度と同一	1
10	地盤単位体積重量(単位体積質量) kg/m^3	1730	1
11	地盤熱伝導率 $\text{kcal/mh}^\circ\text{C}(\text{W/m}^\circ\text{C})$	0.77(0.90)	1
12	地盤比熱 $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}(\text{J/kg}^\circ\text{C})$	0.33(1380)	1

表3-3 数値実験計画

実験ケース	熱伝導率 kcal/mh°C(W/m°C)	比熱 kcal/kg°C(J/kg°C)	打設温度 °C
Case 1-1	1.19 (1.38)	0.26 (1090)	10,20,30
Case 1-2	3.13 (3.64)	0.26 (1090)	10,20,30
Case 1-3	2.16 (2.51)	0.26 (1090)	10,20,30
Case 2-1	2.16 (2.51)	0.20 (840)	10,20,30
Case 2-2	2.16 (2.51)	0.28 (1170)	10,20,30
Case 2-3	2.16 (2.51)	$0.0007 \times T + 0.24$ ($2.9 \times T + 1010$)	10,20,30
Case 2-4	2.16 (2.51)	$0.0007 \times T + 0.19$ ($2.9 \times T + 800$)	10,20,30
Case 2-5	2.16 (2.51)	$0.0007 \times T + 0.215$ ($2.9 \times T + 900$)	10,20,30

表3-4 コンクリートの示方配合

スランブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率	単位量 (kg/m³)			
			セメント	水	細骨材	粗骨材
8	58	45	280	162	813	1027

表3-5 コンクリートの示方配合

スランブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤PN05L
8	60	42	272	163	771	1079	0.680

表3-6 コンクリートの力学的性質

圧縮強度 (kgf/cm²)	258
引張強度 (kgf/cm²)	21.0
弾性係数 (kgf/cm²)	2.53×10^5

表3-8 コンクリートの力学的性質

圧縮強度 (kgf/cm²)	288
引張強度 (kgf/cm²)	21.7
弾性強度 (kgf/cm²)	2.48×10^5

表3-7 コンクリートの示方配合

スランブ (cm)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
8	55.5	44.7	163	294	813	1031

表3-9 各構造物の施工データ

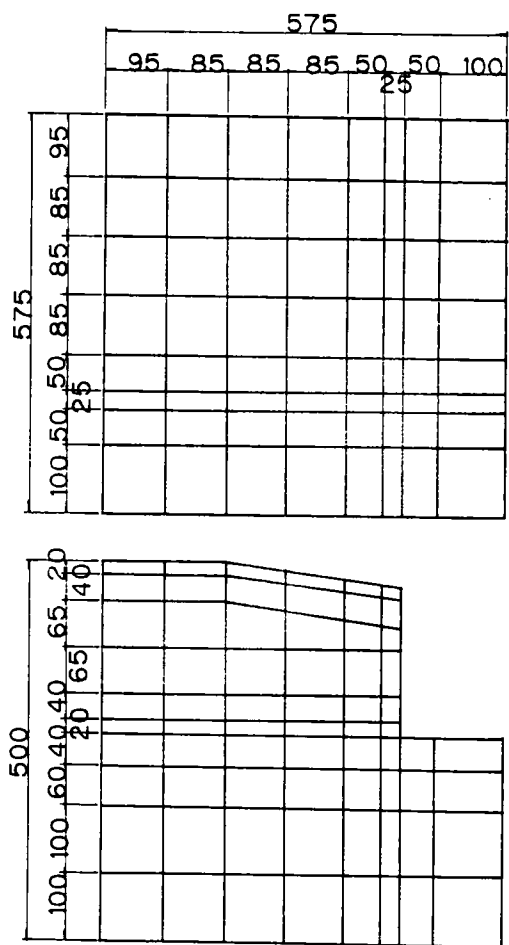
NO	拘束 の種類	部材 厚(D) m	長辺 長(L) m	短辺 長(H) m	モル の種類	単位 モル 量	圧縮 強度 材令 28日 MPa	引張 強度 材令 28日 MPa	弾性 係数 材令 28日 GPa	打設 温度 °C	施工 時期	脱型 材令 日	型枠 の種類	ひび われ の有無	拘束 体の 種類	拘束 体の 弾性 係数 GPa	断熱 温度 上昇 Q °C	断熱 温度 上昇 r °C	拘束 体の 高さ m
1	内	—	1.55	1.55	普通	276	23.7	2.03	25.0	11.0	冬	6	合板	無	—	—	38.2	0.0288	—
2	内	—	1.55	1.55	普通	276	23.7	2.03	25.0	29.0	夏	6	合板	無	—	—	36.0	0.0782	—
3	内	—	3.0	2.6	普通	381	35.3	2.50	29.2	33.0	夏	6	鋼	無	—	—	45.0	0.1107	—
4	内	—	3.0	2.6	普通	381	35.3	2.50	29.2	33.0	夏	6	合板	有	—	—	45.0	0.1107	—
5	内	—	3.0	2.6	普通	381	35.3	2.50	29.2	33.0	夏	1	シート	有	—	—	45.0	0.1107	—
6	内	—	6.0	4.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	1.5	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
7	内	—	6.0	4.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	8	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
8	内	—	6.0	4.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	28	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
9	内	—	6.0	2.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
10	内	—	6.0	2.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	有	—	—	40.2	0.0318	—
11	内	—	6.0	2.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	20	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
12	内	—	4.0	1.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
13	内	—	4.0	1.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	2	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
14	内	—	4.0	1.0	普通	350	37.4	2.60	29.4	15.0	冬	11	合板	無	—	—	40.2	0.0318	—
15	内	8.5	8.5	2.5	普通	280	23.7	2.03	24.7	11.0	冬	4	合板	有	—	—	38.6	0.0294	3.0
16	内	8.5	8.5	2.5	普通	280	23.7	2.03	24.7	29.0	夏	6	合板	無	—	—	36.3	0.0794	3.0
17	内	3.6	7.2	6.08	普通	276	25.3	2.06	24.8	13.0	冬	5	合板	無	—	—	37.8	0.0351	6.0
18	外	1.35	10.0	5.6	普通	270	23.7	2.03	25.2	18.0	冬	10	合板	有	ｽﾔﾌ	24.7	36.4	0.0496	3.5
19	外	1.3	13.0	3.5	普通	285	23.5	2.06	25.0	20.0	秋	4	合板	無	ｽﾔﾌ	25.0	37.4	0.0587	1.7
20	外	1.3	13.0	3.4	普通	285	23.5	2.06	25.0	20.0	秋	4	合板	有	壁	25.0	37.4	0.0587	5.2
21	外	0.3	8.0	2.0	普通	300	32.9	2.80	31.5	30.0	夏	3	合板	無	ｽﾔﾌ	31.5	38.2	0.0797	2.0
22	外	1.0	8.0	2.0	普通	300	32.9	2.80	31.5	30.0	夏	3	合板	無	ｽﾔﾌ	31.5	38.2	0.0797	2.0
23	外	0.8	20.0	3.6	普通	371	29.9	2.45	28.1	25.0	夏	9	合板	有	ｽﾔﾌ	28.1	44.7	0.0914	1.0
24	外	1.4	20.0	4.9	普通	366	34.1	2.74	30.4	27.0	夏	9	合板	有	ｽﾔﾌ	30.4	44.0	0.0967	1.0
25	外	0.8	9.8	3.1	普通	284	20.3	1.86	20.4	25.0	夏	9	合板	有	ｽﾔﾌ	20.4	36.9	0.0707	1.0
26	外	0.65	8.0	2.7	普通	403	38.2	3.25	29.7	21.0	冬	6	合板	有	ｽﾔﾌ	29.7	48.0	0.0847	0.6
27	外	0.4	27.3	2.8	普通	294	28.2	2.13	24.3	25.0	夏	5	合板	無	壁	24.3	37.8	0.0731	11.9
28	外	1.6	18.8	4.2	高B	299	23.8	1.98	31.4	27.0	秋	10	鋼	有	ｽﾔﾌ	32.7	38.3	0.7900	1.7
29	外	1.3	27.0	3.4	高B	299	23.8	1.98	29.0	23.0	秋	10	鋼	有	ｽﾔﾌ	32.6	39.5	0.6100	7.0
30	外	0.9	25.0	1.5	普通	306	29.0	2.31	31.5	12.0	冬	6	鋼	有	壁	32.3	41.8	0.6120	1.55
31	外	0.9	25.0	2.4	普通	306	29.0	2.31	31.5	23.5	春	6	鋼	有	壁	33.1	40.2	1.0860	3.05
32	外	0.9	25.0	1.8	普通	306	29.0	2.31	31.5	30.0	夏	6	鋼	有	壁	32.7	39.0	1.5450	9.8
33	外	0.7	25.0	3.1	普通	306	29.0	2.31	31.5	22.0	秋	6	鋼	有	壁	32.8	40.4	1.0160	10.7
34	外	1.1	24.0	3.9	普通	306	30.5	2.41	32.1	27.0	春	5	鋼	有	壁	33.3	39.7	1.2500	1.75
35	外	1.1	24.0	3.9	普通	306	30.6	2.41	32.1	25.5	夏	5	鋼	有	壁	33.3	40.0	1.1810	7.95
36	外	1.1	25.0	3.9	普通	306	29.1	2.32	31.6	29.0	夏	5	鋼	有	壁	32.5	39.5	1.3430	7.95
37	外	1.0	25.0	3.9	普通	306	30.1	2.39	31.9	27.8	春	5	鋼	有	壁	32.9	39.6	1.2970	1.75
38	外	2.2	28.5	2.5	中庸	256	24.4	2.02	29.6	28.1	夏	4	合板	有	壁	31.3	37.9	2.3470	5.0
39	外	2.0	28.5	2.5	中庸	256	24.4	2.02	29.6	22.1	秋	4	合板	有	壁	30.9	37.2	1.8380	7.5
40	外	1.8	28.5	2.5	中庸	256	24.4	2.02	29.6	22.6	秋	4	合板	有	壁	30.9	37.3	1.8810	10.0
41	外	1.7	8.1	3.1	高A	268	21.8	1.84	28.0	14.0	春	3	鋼	無	ｽﾔﾌ	28.9	31.2	0.4630	3.2
42	外	1.7	8.1	3.1	高A	268	21.8	1.84	28.0	14.0	春	5	鋼	無	壁	29.1	31.2	0.4630	6.25
43	外	1.7	8.1	3.9	高A	279	21.8	1.84	28.0	23.5	夏	23	鋼	無	壁	29.6	33.4	0.8310	9.3

表3-10 各構造物の温度解析結果

NO	最高 温度 °C	最高 温度 材令 日	最高 温度 差 °C	温度 下降 量 °C	NO	最高 温度 °C	最高 温度 材令 日	最高 温度 差 °C	温度 下降 量 °C
1	42.5	3.0	25.8	—	23	37.1	1.0	12.4	24.9
2	64.3	2.0	25.5	—	24	44.4	1.0	22.2	36.2
3	78.5	1.5	39.3	—	25	33.3	1.0	12.4	31.8
4	78.5	1.5	29.7	—	26	31.7	0.5	5.9	30.8
5	78.5	1.5	38.6	—	27	51.4	1.0	9.5	22.5
6	53.5	4.5	54.6	—	28	53.2	2.0	18.9	27.7
7	54.0	5.0	53.5	—	29	44.6	2.0	15.9	22.0
8	54.0	5.0	28.7	—	30	24.4	1.0	6.8	15.3
9	46.3	2.5	45.0	—	31	45.3	1.0	8.1	24.7
10	47.1	3.0	50.1	—	32	57.9	1.0	6.7	26.1
11	47.7	3.0	17.7	—	33	41.3	1.0	5.3	25.2
12	35.6	2.0	32.6	—	34	52.4	1.0	13.4	30.6
13	38.1	2.0	35.6	—	35	55.7	1.5	9.1	22.5
14	38.1	2.0	12.1	—	36	58.8	1.5	9.9	25.1
15	44.3	3.5	32.3	—	37	52.2	1.0	11.9	30.4
16	64.7	2.0	31.0	—	38	69.1	1.5	14.5	33.2
17	49.5	4.0	32.4	—	39	58.8	1.5	14.3	37.0
18	38.9	1.55	15.7	23.3	40	59.1	1.5	12.2	38.2
19	49.2	1.5	14.3	25.1	41	34.4	4.0	13.9	9.2
20	49.4	1.5	13.7	28.0	42	34.3	4.0	13.7	9.1
21	43.7	0.5	2.4	17.9	43	51.4	2.5	14.4	14.4
22	56.9	1.0	11.1	26.7					

表3-11 各指数の混在比率

指数	混在比率(%)
ひびわれ危険指数 (I_1)	41
土木学会提案 温度ひびわれ指数 (厳密算定)	41
ひびわれ危険指数 (I_2)	51
最大温度差および平均温度降下量	51
土木学会提案 温度ひびわれ指数 (簡易算定)	73



単位 (cm)

図3-1 フーチング要素分割図

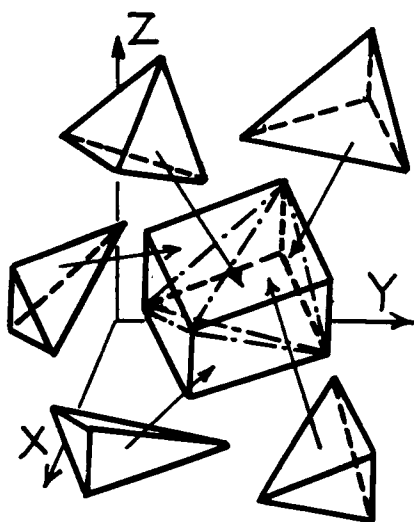


图3-2 六面体复合要素

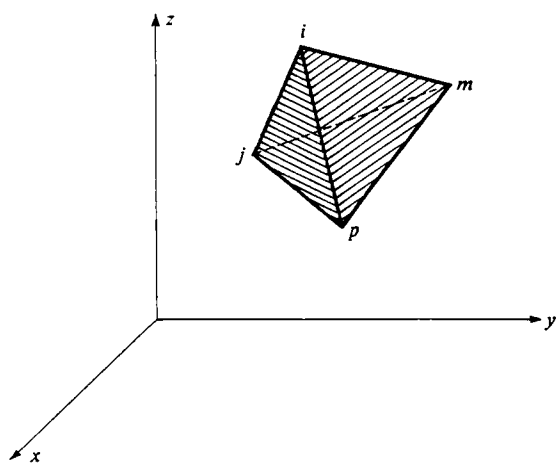


图3-3 四面体要素图

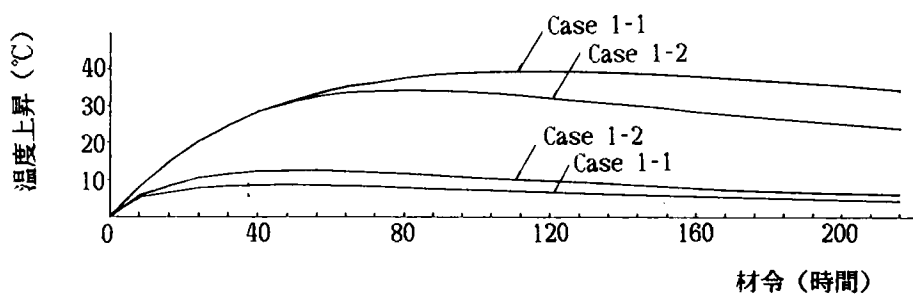


図3-4 中心部と表面部の温度上昇（打設温度10°C）

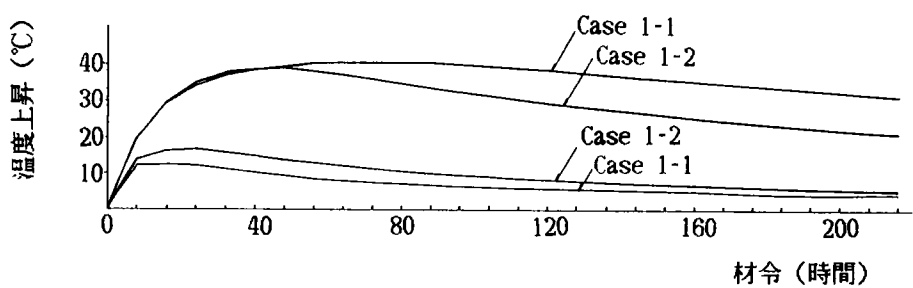


図3-5 中心部と表面部の温度上昇（打設温度30°C）

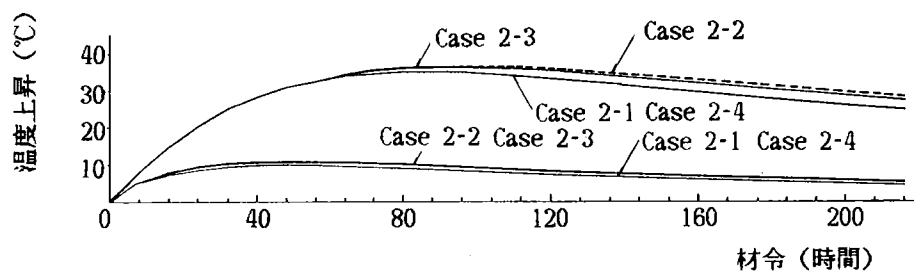


図3-6 中心部と表面部の温度上昇（打設温度10℃）

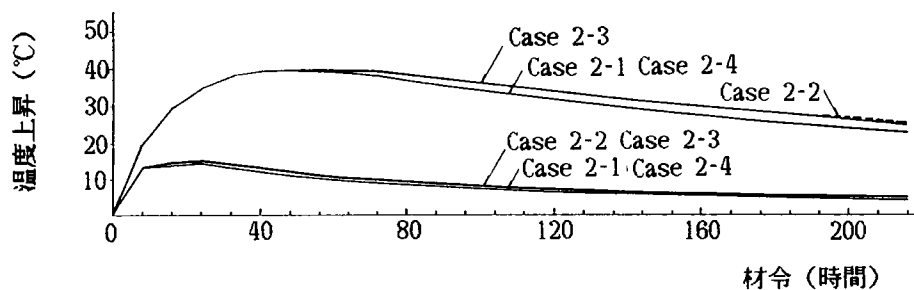


図3-7 中心部と表面部の温度上昇（打設温度30℃）

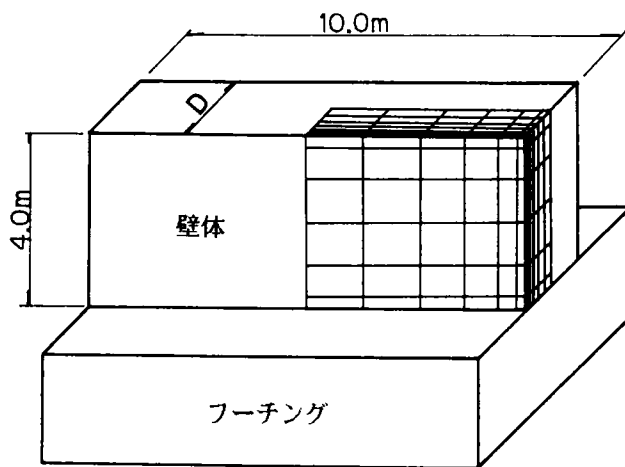


図3-8 熱伝達率と風速の関係

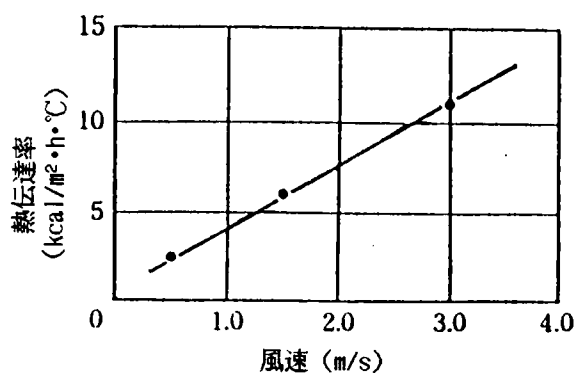


図3-9 壁体モデル形状・寸法

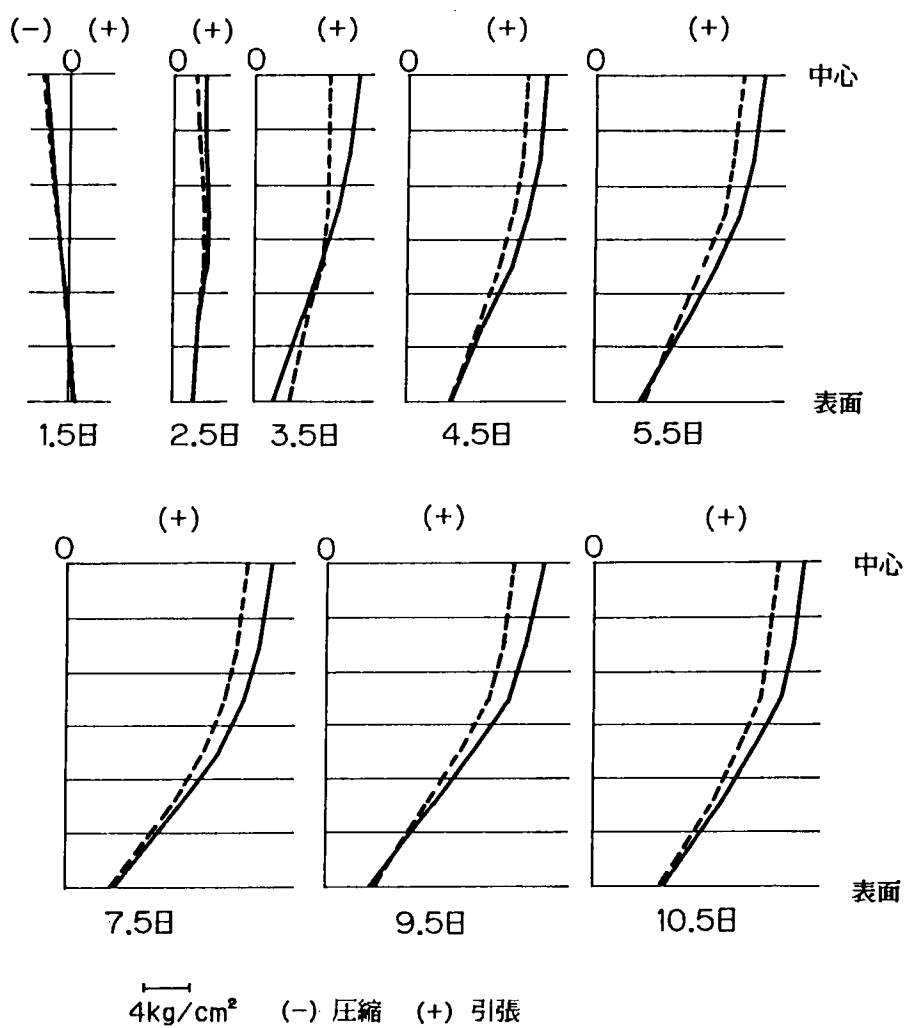


図3-10 直応力の σ_x の経時変化 (D=1.2m, 夏)

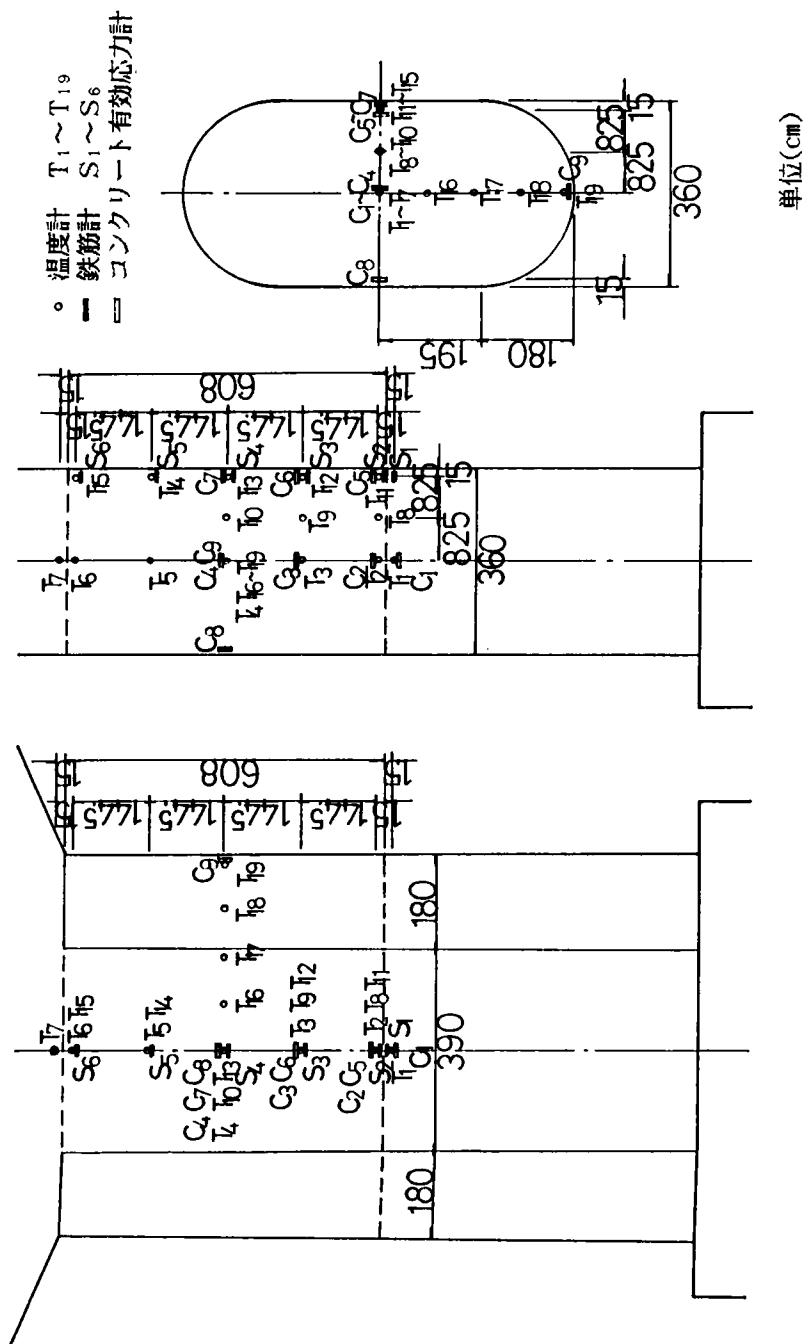
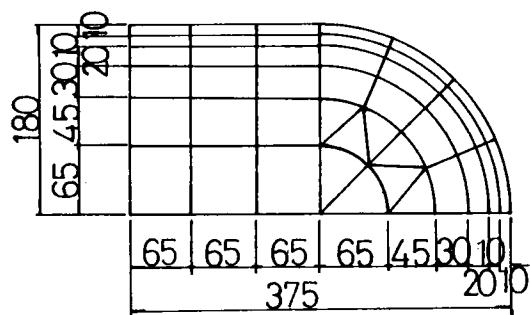


図3-11 橋脚柱形状・寸法と計器埋設位置



単位(cm)

図3-12 橋脚柱要素分割図

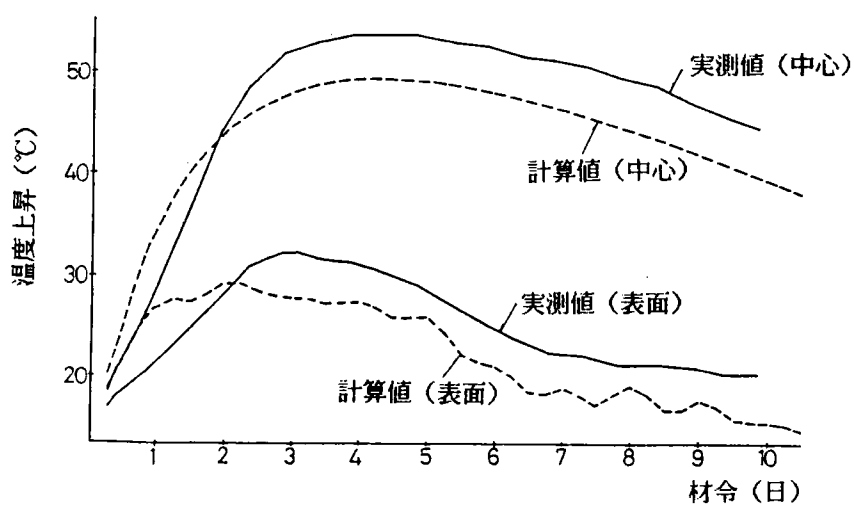


図3-13 中央部のコンクリート温度上昇

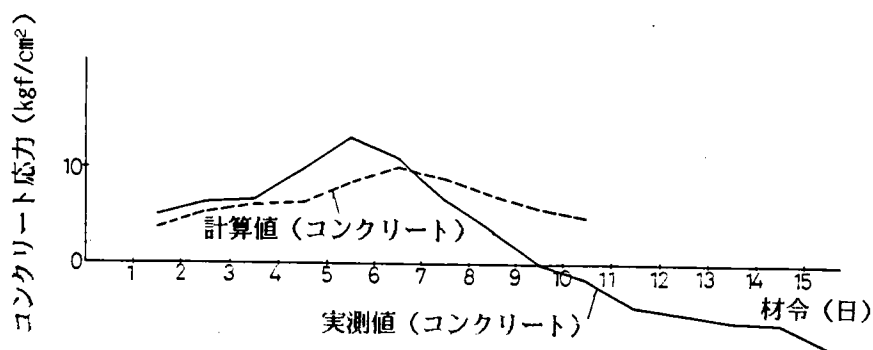


図3-14 中央部表面の温度応力

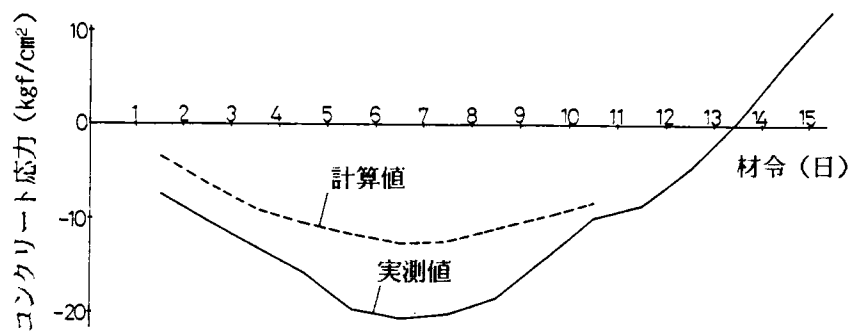


図3-15 中央部中心の温度応力

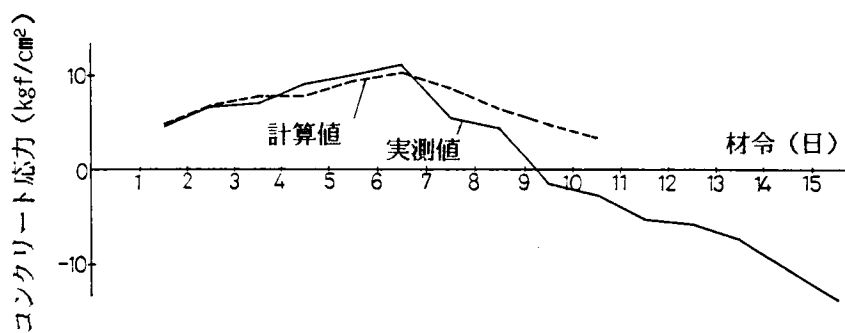


図3-16 中央部表面の鉛直方向温度応力

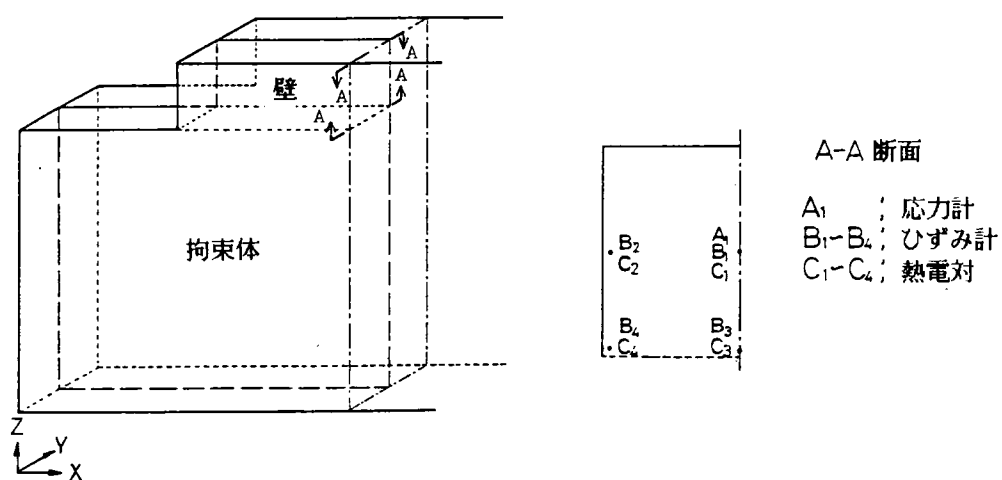


図3-17 コンクリート壁体 計器埋設位置

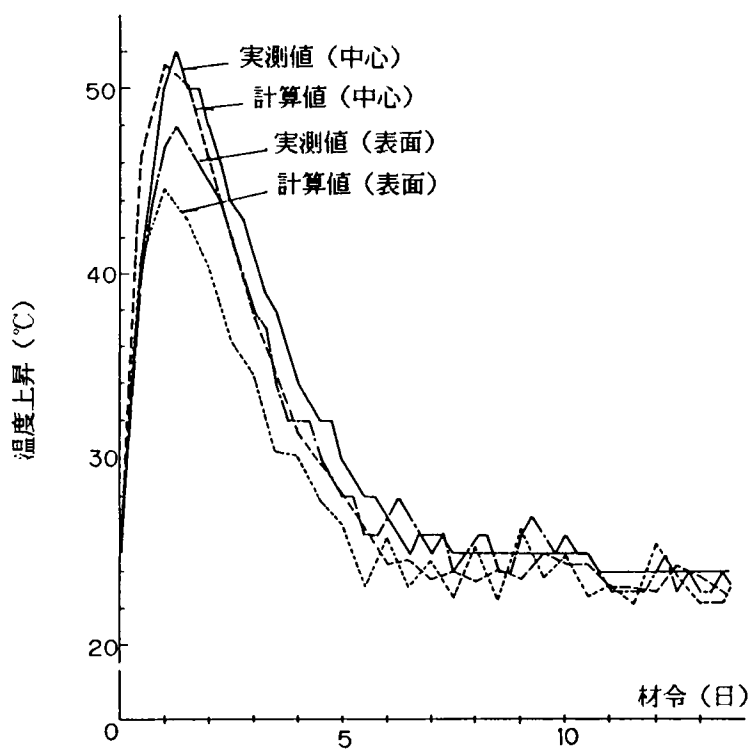


図3-18 コンクリートの温度上昇

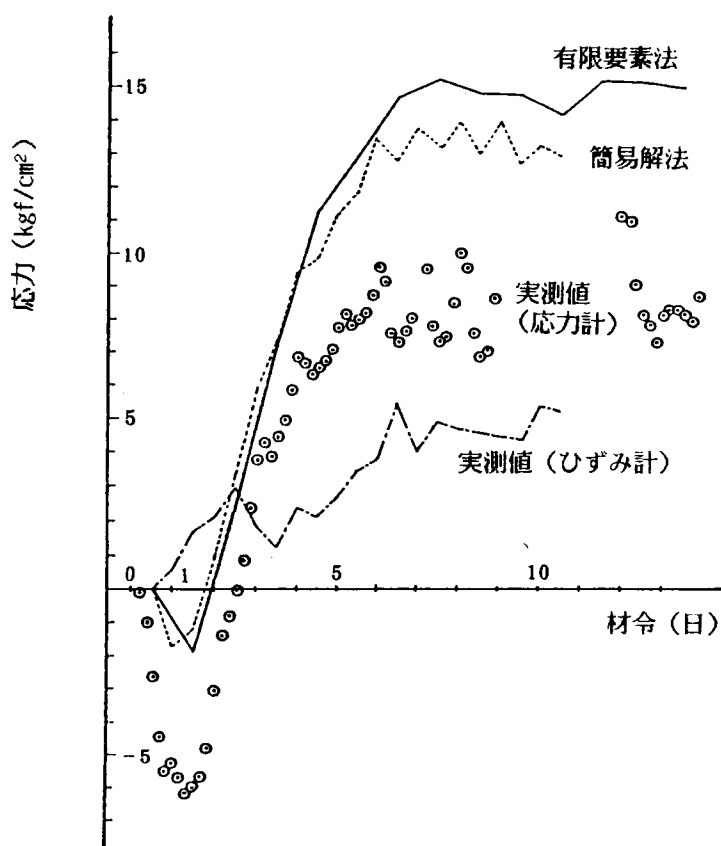


図3-19 温度応力（中央部中心）

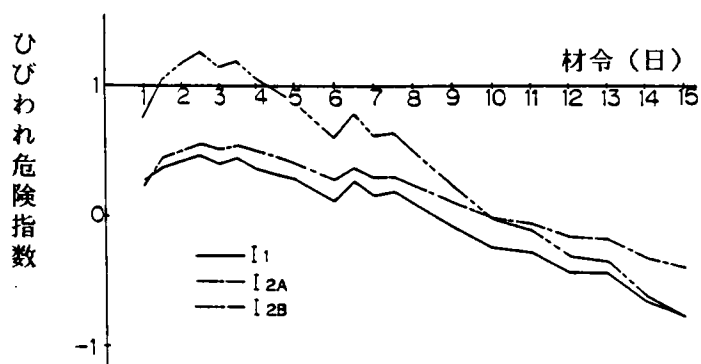


図3-20 No.1構造物のひびわれ危険指数

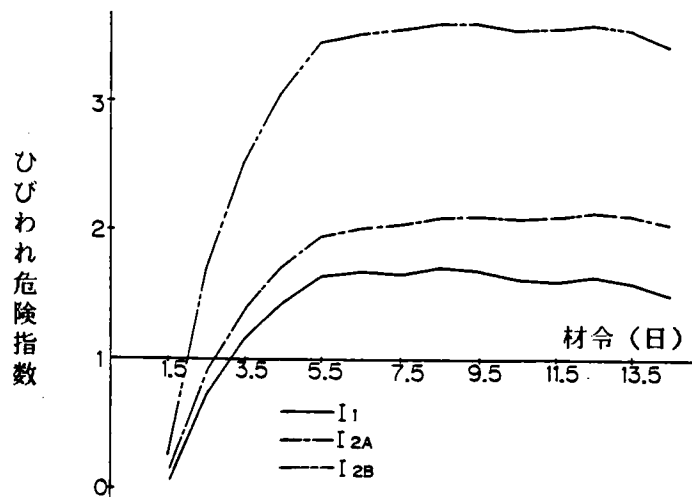


図3-21 No.23構造物のひびわれ危険指数

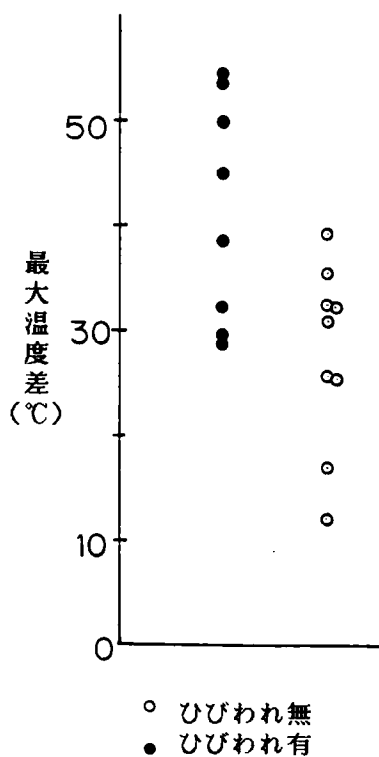


図3-22 最大温度差の分布

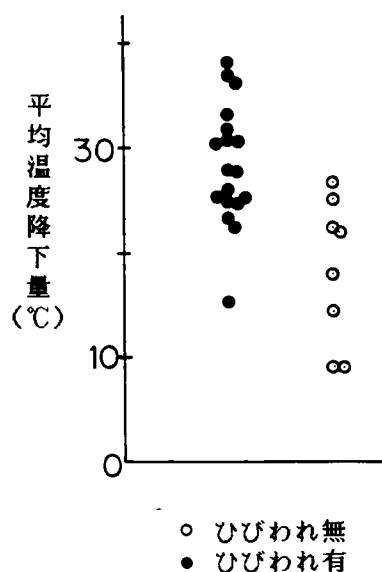


図3-23 平均温度降下量の分布

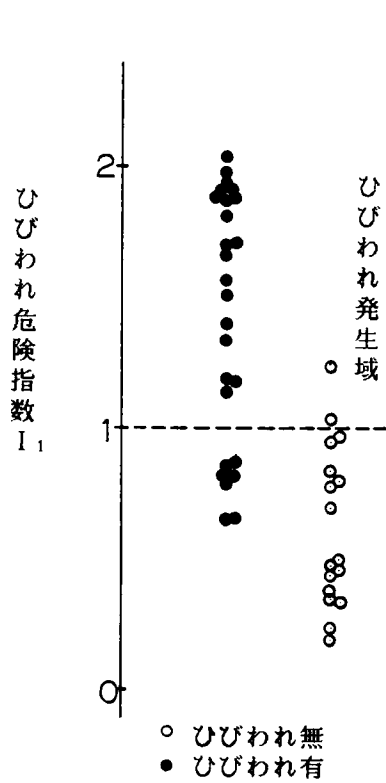


図3-24 ひびわれ危険指数 I_1 の分布

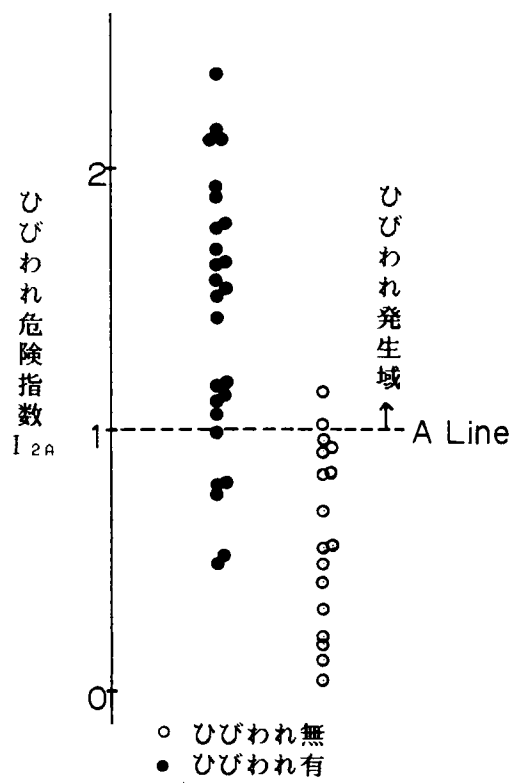


図3-25 ひびわれ危険指数 I_{2A} の分布

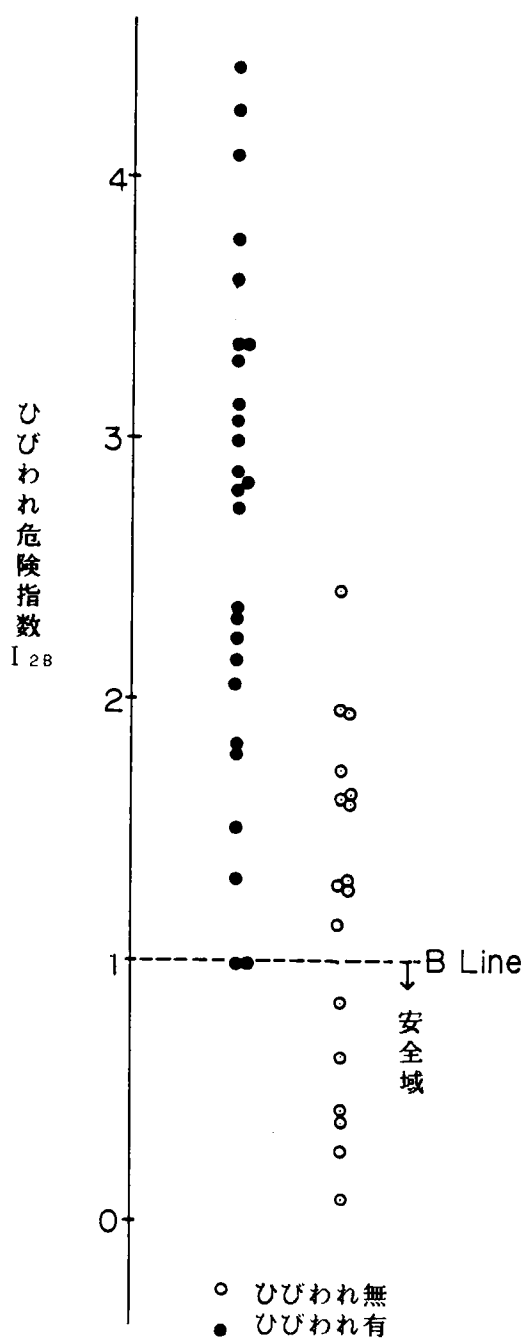


図3-26 ひびわれ危険指数 I_{2B} の分布

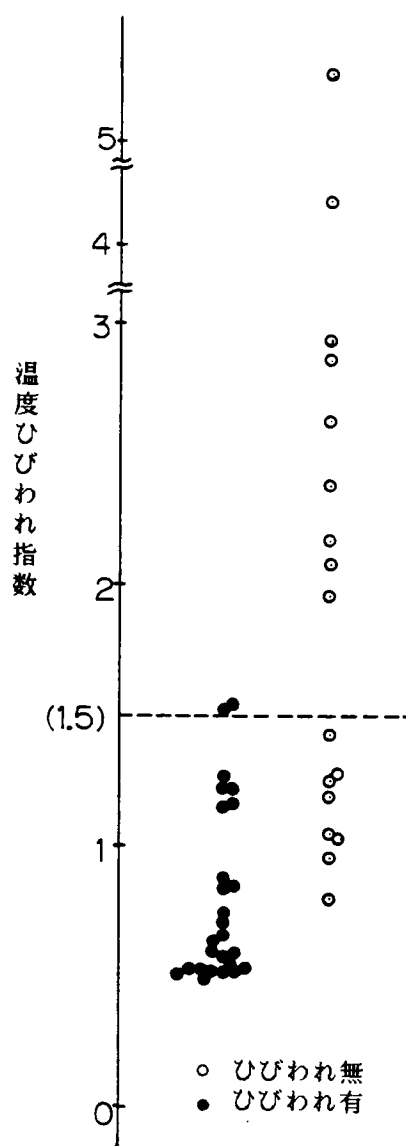


図3-27 応力解析から求めた
温度ひびわれ指数の分布

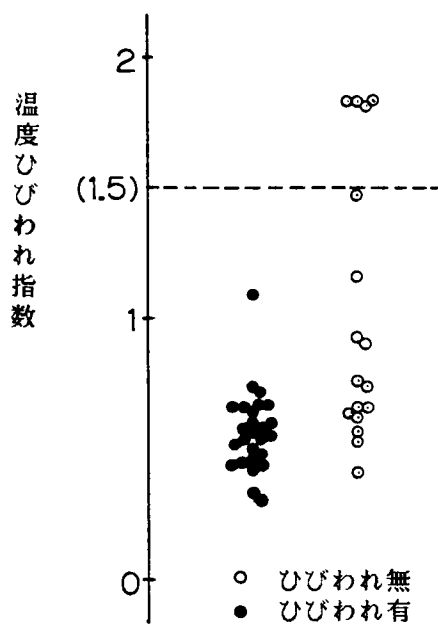


図3-28 温度から求めた
温度ひびわれ指数の分布

第4章 若材令コンクリートのリラクセーション特性とその評価法に関する研究

4.1 概説

3章では、温度ひびわれ危険度指数のばらつきと適用性を明らかにした。温度ひびわれの防止、あるいは制御技術の向上を計るためには、その基礎となる温度応力解析の合理化と精度の向上が不可欠であると考えられる。

さて、コンクリートの施工段階で問題となるセメントの水和熱に起因する温度応力は、コンクリートが若材令であるため、コンクリートのリラクセーションの影響が特に顕著である。従って、精度の良い温度応力解析を行うためには、解析で用いるコンクリート構成式において、リラクセーション関数あるいはクリープ関数などを用いてコンクリートのリラクセーション挙動を合理的に表現することが必要となる。コンクリートのリラクセーションとクリープとは、主としてコンクリートの粘弾性的性質に起因する現象であり、この意味において両者は表裏一体をなすものと考えられ、理論的にも両者を一対一に関係づけることが可能である。このうち、コンクリートのクリープについては、現在まで数多くの研究が行われており、資料の蓄積も比較的豊富である。このため従来から、温度応力解析においては、専らクリープ特性が用いられてきた。代表的なものとして、McHenry⁽¹⁾、Raphael⁽²⁾、Carlson⁽³⁾、Arutyunyan⁽⁴⁾、さらには君島⁽⁵⁾などの報文がある。これらの研究では、変動応力場に対するコンクリート構成式として、クリープ関数を用いた重ね合わせの原理にもとづく履歴理論により導き出されたものが基本的に用いられている。この場合、構成式は応力を未知関数とする積分方程式となり、これを解くことによりリラクセーションの影響を求めることができる。しかしながら、温度応力は基本的には温度ひずみの拘束により生じる応力であり、これが時間の経過に伴って緩和して行くのであるから、変動応力場に対する構成式表示法として重ね合わせの原理を用いる場合でも、クリープ関数よりむしろ、ひずみで応力を規定する形、すなわち、リラクセーション関数を用いた方が直接的かつ物理的意味も明快になると考えられる。さらに、リラクセーション特性は各種の温度応力の簡易解法において、温度応力のリラクセーション量を簡略的に推定する目的にも有効に利用できる利点を有している。このようなリラクセーション関数の有用性については、第5章および第6章においてさらに具体的に詳述するが、いずれにしても、コンクリートのリラクセーション特性は、温度応力解析において極めて重要な力学的特性である。しかしながら、コンクリートのリラクセーション特性に関する実験的研究は非常に少ない現状にあり、特に、若材令におけるリラクセーション特性に関し

ては、過去に 1, 2 の報告例^{(6) (7)}を数えるのみである。このようにコンクリートのリラクセーション特性に関する実験的研究が極めて少ないのは、リラクセーション試験を実施する際に、供試体に対するひずみ制御および応力緩和量の検出などにおいて多くの測定技術上の困難を伴うことがまず第 1 に考えられる。すなわち、一定ひずみ負荷条件下におけるリラクセーション試験においては、試験実施中、長期間にわたり供試体のひずみを一定に制御しながら、継続的に負荷応力の変化量を記録してゆく必要がある。実際の試験においてこれらの作業を精度よく行うことは、相当の試験技術を必要とし、今までの試験技術ではかなりの困難を伴ったものと考えられる。しかし、近年の各種実験測定機器への電子技術の導入と実験技術の飛躍的な向上により、従来は実施困難な試験の一つであったコンクリートのリラクセーション試験が、比較的精度よく行うことが可能となった。

本章では、供試体のひずみ制御を精度よくおこなうことを念頭において構成した試験機システムを用い、温度応力のリラクセーション解析において特に重要となる、若材令コンクリートの圧縮および引張りリラクセーション特性と、これらにおよぼす載荷材令、載荷ひずみ（応力）レベルならびに配合の影響を明らかにすると共に、実験より得られたデータをもとに、圧縮ならびに引張りリラクセーション特性に対する評価式の提案を行なう^{(6) (7) (8) (9) (10)}。

4. 2 圧縮リラクセーション特性とその評価法

4. 2. 1 圧縮リラクセーション関数

本研究では、圧縮リラクセーション関数として西林、木山^{(11) (12)}の研究を参考にして、式（4-1）に示すような双曲線型の実験式を考えた。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + C t}{A + t} \quad (4-1)$$

ここで、 σ_t ：載荷 t 時間後の応力

σ_i ：初期応力

A, C ：実験定数

実験定数 A, C は、次のような物理的意味を持つ。式（4-1）において、 $t = \infty$ とすると、 $\sigma_t / \sigma_i = C$ となる。すなわち、定数 C は、初期応力 σ_i に対する終局残留応力 σ_∞ の比率を表す。従って、 $(1 - C)$ が終局緩和量を表すことになる。また、 $t = t_a$ の時、 $\sigma = \sigma_a$ 。

$= (\sigma_i + \sigma_0) / 2$ とおけば、 $t_0 = A$ となる。従って、定数Aは、緩和量が終局緩和量の1/2に達する時間、すなわち1/2緩和時間を表すことになる。

実験定数A、Cは、最小二乗法を適用することにより実験値を用いて次式から求めることができる。

$$A = \frac{\begin{vmatrix} \sum \sigma(1-\sigma) & \sum t(1-\sigma) \\ \sum (\sigma t^2) & \sum t^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum (1-\sigma)^2 & \sum t(1-\sigma) \\ \sum t(1-\sigma) & \sum t^2 \end{vmatrix}} \quad (4-2)$$

$$C = \frac{\begin{vmatrix} \sum (\sigma-1)^2 & \sum \sigma t(1-\sigma) \\ \sum t(1-\sigma) & \sum (\sigma t^2) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum (\sigma-1)^2 & \sum t(1-\sigma) \\ \sum t(1-\sigma) & \sum t^2 \end{vmatrix}} \quad (4-3)$$

ただし、 t : 時間

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{\sigma_i} : \text{時間} t \text{ における残留応力比}$$

4. 2. 2 実験計画

(1) 実験方法

本研究では、コンクリートのリラクセーション特性に影響をおよぼすと考えられる載荷材令、載荷ひずみレベルおよび配合の3つを実験因子とした。載荷材令は1日、3日、7日、14日および21日の5材令とした。供試体に対する拘束ひずみレベルの規定については、本研究では直接的なひずみを用いる方法にかえて、載荷時の圧縮強度に対する一定比率の応力により間接的にこれを規定した。すなわち、試験時の供試体への載荷レベルは、応力-強度比により決定した。本実験での導入応力レベルは、圧縮リラクセーション試験については、圧縮強度の30%、50%および80%の3レベルとした。配合については、実際のマスコンクリート構造物に用いられた配合の内から、低水セメント比の配合と高水セメント比の配合の2種について検討を行った。以下、前者の配合をA配合、後者の配合をB配合と呼ぶことにする。表4-1、4-2にA配合、B配

合それぞれの示方配合を示す。なお、B配合のコンクリートのリラクセーション試験においては、載荷材令は3日と21日の2材令、また導入応力レベルについては、50%の1レベルのみを実施した。表4-3に圧縮リラクセーション実験各シリーズにおける実験条件をまとめて示す。

(2) 載荷装置

圧縮リラクセーション試験は、図4-1に示すように電子式荷重負荷制御装置付万能試験機を主体とするものである。図において、供試体のひずみは試験機圧盤間変位として変位計により検出される。供試体のひずみは、ひずみ制御用X-Yレコーダを介して荷重負荷制御回路に入力される。制御回路では、入力された供試体のひずみ量と試験条件として規定されたひずみ設定値とを比較し、両者の差をもとにポテンシオメータを介してサーボモータで制御弁を動作させ、圧盤間変位を補正することにより供試体のひずみを一定に保つような機構になっている。一方、供試体における応力緩和量は、荷重検出用のポテンシオメータの出力としてX-Yレコーダ上に記録される。なお、本研究ではひずみ検出用の変位計として1/1000mm精度のものをを用いたが、試験機システムの総合的な制御精度は、変位計の他に電子制御回路の調整、増幅アンプの安定性、油温等いくつかの要因に影響を受ける。本研究で用いた試験機システムの総合的な制御精度は、供試体ひずみに対して±1%以内であることを確認している。

(3) 供試体

供試体は、10×10×40cmの角柱供試体を用いた。各供試体は試験直前まで温度20℃、湿度90%以上の恒温槽で養生を行い、試験時には供試体からの水分の逸散を防ぐために表面にパラフィンを塗布した。試験実施中は、空調機を用いて（図4-1参照）、供試体温度を常に20±2℃の範囲内保った。また、リラクセーション試験に先立ち、圧縮強度試験を行い、これらの強度試験値をもちいて供試体への載荷応力の値を決定した。各材令におけるA配合とB配合コンクリートの圧縮強度、引張強度および弾性係数をまとめて表4-4に示す。供試体作成に用いたコンクリート材料としては、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂、（比重2.58，F.M. 2.53）そして粗骨材は碎石（比重2.60，F.M. 6.92，最大寸法25mm）を用いた。

4.2.3 実験結果および考察

(1) 圧縮リラクセーション特性に及ぼす載荷応力レベルの影響

図4-2～4-6に、載荷材令1，3，7，14および21日における、A配合コンクリートの各応力レベルに対する圧縮リラクセーション試験結果を示す。各図において、縦軸は初期応力に対する残留応力の比率を、また横軸は応力導入後の経過時間を表す。さらに、図中には、前述

のように実測値から最小自乗法を適用して求めたリラクセーション関数も合わせて示してある。各実験結果から、一部の実験曲線において雰囲気温度の変化にともなう供試体ひずみ検出用変位計の出力変動に起因すると考えられる周期的な変動が認められるが、全般的にはなめらかなリラクセーション曲線が得られている。各材令、各応力レベルに共通した定性的特徴として、載荷後1時間以内に全緩和量の25～40%程度の応力緩和が急速に進行し、その後は次第に緩慢となり載荷後約100時間程度でほぼ最終的な緩和量に達することが挙げられる。このことから、リラクセーションは、これと関連のあるクリープにくらべてかなり短期終結性であると考えられる。図4-2の、載荷材令1日におけるリラクセーション曲線について、載荷応力レベルが30%、50%および80%と変化しても各曲線間に大きな差異は認められない。すなわち、1/2緩和時間と終局緩和量は、いずれの応力レベルにおいてもそれぞれ25～30時間および95%程度となっている。図4-3、4-6から、載荷材令3日においても、載荷応力レベルにかかわらず1/2緩和時間と終局緩和量は、それぞれ10～14時間、および65%程度、同様に載荷材令7日では、5～15時間および45%程度、また、その他の載荷材令でも同様で、載荷応力レベルが変化してもリラクセーション特性には有意な差異は認められない。このことから、いずれの載荷材令においても、少なくとも圧縮強度の80%程度の応力レベルまでは、応力緩和率は一定という線形則が、ほぼ成立すると仮定しても大きな誤りはないものと考えられる。

(2) 圧縮リラクセーション特性に及ぼす載荷材令の影響

各載荷材令における、圧縮リラクセーション曲線の1/2緩和時間と終局緩和量の値の範囲を、表4-5に示す。表4-5から、載荷材令が大きくなるに伴い、終局緩和量は減少していく傾向を示しており、特に、材令7日以前においてその変化が大きいたことがわかる。一方、1/2緩和時間は、終局緩和量にくらべばらつきが大きいため、載荷材令の影響は明確ではないが、平均的に見るとやはり載荷材令が大きくなると減少していく傾向にある。

このように、載荷材令が大きくなるとリラクセーション量が少なくなり、かつ、リラクセーションが早く終結する傾向を示すが、このことは、材令が進行するに伴い、コンクリートの粘弾性的性質が弱まることを示唆しているものと考えることができる。

(3) 圧縮リラクセーション特性に及ぼす配合の影響

載荷材令3日および21日における、A配合コンクリートとB配合コンクリートの圧縮リラクセーション試験結果を、図4-7ならびに図4-8に示す。B配合はA配合にくらべ水セメント比が10%大きく、かつ単位セメント量が 74kg/m^3 少ない配合となっているが、クリープにおいては水セメント比の増大と単位セメント量の減少のいずれもがクリープを増大させる。しかし、載荷応力レベルが同一の場合は、水セメント比の影響は小さいことが指摘されている⁽¹³⁾。さて、図

4-7ならびに図4-8のA配合とB配合のリラクセーション結果は載荷応力レベルをいずれも50%としたものである。A配合とB配合のリラクセーション特性に注目すると、図4-7から、載荷材令3日でのA配合コンクリートの終局緩和量は平均66%、一方、B配合コンクリートは平均74%で、その差は8%程度となり両者には大きな差異は認められない。一方、1/2緩和時間についてもA配合コンクリートとB配合コンクリートの間には明確な差異は認められない。

図4-8から、載荷材令21日においても載荷材令3日と同様、B配合コンクリートの終局緩和量がやや大きくなる傾向を示すが、平均値で見れば両者の差は7%程度である。一方、1/2緩和時間においても両者の間には明確な差異は認められない。

以上の結果から、リラクセーション特性は、クリープ特性と同様、載荷応力レベルが同一の場合、水セメント比および単位セメント量がリラクセーション特性におよぼす影響は小さく、水セメント比の10%増加、ならびに単位セメント量の 74kg/m^3 の減少に対して、終局緩和量が7~8%程度増加するにとどまることが明らかとなった。

(4) 圧縮リラクセーション特性の評価法

図4-2~4-6の、各図中に示されたリラクセーション関数は、各材令における全ての実験値に最小二乗法を適用することにより求めたものであるが、各図から、各材令とも載荷初期、特に、載荷後6時間程度までは、リラクセーション関数は実測値より大きな値を与えるものの、一般的にみると、実験値とリラクセーション関数とは良好に合致している。温度応力などのリラクセーション解析では、解析時間ステップ内での応力緩和増分の評価が必要となる。しかしながら、時間ステップ内での緩和の過程については特に問題とはならない。一方、マスコンクリートの一般的な温度応力解析では、解析時間ステップを小さく設定する場合でも、6時間程度とすれば解析精度的には十分であると考えられ、各図に見られるような、リラクセーション関数の載荷後6時間以内における誤差は特に大きな問題とはならず、式(4-1)を温度応力解析における若材令コンクリートの圧縮リラクセーション関数として用いることが十分可能であると考えられる。つぎに、実験から得られた全てのリラクセーション関数における定数AならびにCの値と載荷材令との関係を、片対数紙上にプロットすると図4-9、4-10が得られる。前述のように、定数Aは1/2緩和時間を、また、定数Cは終局残留応力を表すが、各図から、材令の進行に伴い定数Aは減少し、一方、定数Cは逆に増加する傾向を示している。ただし、定数Aは、定数Cにくらべてかなりのばらつきを生じている。本研究では、定数AならびにCの図上での定性的な傾向から、これらを材令7日を境として2本の直線で表すことにした。この際、定数Aについては、ばらつきが大きく材令との相関も小さいと推定されるが、その評価に際しては、ばらつきの範囲内での平均的な値を与えればよいと考えた。定数AならびにCの評価式として対数関数を考え、最小二乗法によりこれらを次のように決定した。

$$\begin{aligned}
A &= -8.25 \ln t + 9.74 & (t < 168\text{hr}) & (4-4a) \\
&= 7.43 & (t \geq 168\text{hr}) & (4-4b) \\
C &= 0.25 \ln t - 0.75 & (t < 168\text{hr}) & (4-5a) \\
&= 0.07 \ln t + 0.18 & (t \geq 168\text{hr}) & (4-5b)
\end{aligned}$$

式(4-4)と式(4-5)を、それぞれ図4-9ならびに図4-10に実線で示す。以上のような実験結果とその解析により、任意材令の圧縮リラクセーション特性が、式(4-1)，(4-4)，(4-5)などにより評価することが可能となった。

4. 3 引張りリラクセーション関数とその評価法

4. 3. 1 引張りリラクセーション関数

若材令コンクリートの引張りリラクセーション特性を表現するための引張りリラクセーション関数として、本研究では次式のように、圧縮リラクセーション関数と全く同一の双曲線型の実験式を用いた。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + C t}{A + t} \quad (4-6)$$

上式中の各項の意味ならびに実験定数A，Cの決定法は、圧縮リラクセーション関数の場合と同様であるので、ここでの説明は省略する。

4. 3. 2 載荷フレームの剛性についての検討

引張りリラクセーション試験は、図4-11に示すような高剛性載荷フレームにより実施した。供試体への引張りずみの導入は、供試体両端に埋設された定着盤を介した、特製ボルトによるボルト締めにより行った。さて、供試体に引張りずみを導入すると、その反力により載荷フレームには弾性変形が生じるが、この変形は供試体のリラクセーションに伴い弾性回復する。従って、載荷フレームの変形が大きい場合は、一定ひずみの保持という点において、実験精度上大きな問題が生じるものと考えられる。

本研究では引張りリラクセーション実験を実施するにあたり、載荷フレームなど拘束体の剛性

K_1 と供試体の剛性 K_2 の比 K_1/K_2 が実験結果におよぼす影響を、有限要素法による数値シミュレーションにより検討を行った。解析は、剛比（ K_1/K_2 ）が0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0 および無限大の6ケースについて実施した。ここで、剛比が無限大のケースは、供試体が完全拘束下おかれる場合、すなわち理想的な試験条件下でのリラクセーション試験に相当するものである。解析モデルは、図4-12に示すように拘束体の剛性をバネで表し、供試体の端部をこのバネで拘束したものである。解析手順としては、最初に供試体に初期ひずみを導入し、その後の時間経過に伴うばね反力の変化を求め、これを供試体のリラクセーション測定値とした。載荷材令は3日, 7日, 21日および28日とし、コンクリートの弾性係数ならびに供試体自体のリラクセーション特性は、圧縮リラクセーション試験結果を参考にして次式を設定した。

[コンクリートの弾性係数]

$$E_t = \frac{351000 \times t}{2.15 + t} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (4-7)$$

[コンクリートのリラクセーション特性]

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + C t}{A + t} \quad (4-8)$$

ただし、 $T < 168$: $A = -8.25 \ln(T) + 49.74$

$$C = 0.25 \ln(T) - 0.76$$

$T \geq 168$: $A = 7.43$

$$C = 0.07 \ln(T) + 0.18$$

ここで、 t : 時間

T : 載荷材令 (時間)

図4-13, 4-14に、載荷材令3日と28日における解析結果を示す。図中の応力緩和曲線は、上から順に剛比（ K_1/K_2 ）が、0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0, ∞ に対するものである。これらの図から、拘束体と供試体の剛比（ K_1/K_2 ）が小さいと、完全拘束の場合に比べて緩和量を著しく小さく測定することがわかる。また、載荷時材令が大きくなると全般的に緩和量は減少するが、剛比の影響は同様である。

図4-15, 4-16は、載荷材令3日と28日における剛比(K_1/K_2)と終局緩和量との関係を表したものである。図中、x軸に平行な線は完全拘束状態($K_1/K_2=\infty$)における終局緩和量を示している。これらの結果より、剛比(K_1/K_2)が大きくなるにつれて完全拘束状態の終局緩和量に漸近していくが、特に若材令において剛比の影響が大きい。また、材令が大きくなると終局緩和量に対する剛比の影響が小さくなることがわかる。

図4-15, 4-16から、剛比が10.0以上になると完全拘束状態の終局緩和量に対する誤差が15%以下になることがわかる。

図4-17, 4-18に、載荷材令3日と28日のそれぞれにおいて、剛比(K_1/K_2)が1.0, 10.0, ∞ と変化した場合の緩和率の進行状況を示す。これらの図より、剛比が小さければ緩和率の進行は若干早くなるがその差は無視できる程度であり、剛比が変化しても緩和率の進行は同一と考えてよいことがわかる。

以上のような数値シミュレーション結果から次のような結論が得られた。

(1) リラクセーション試験における拘束体と供試体との剛比は、終局緩和量に影響を与えるが、緩和率の進行にはほとんど影響を与えない。従って、剛比と終局緩和量との関係を用いて、任意剛比のリラクセーション特性から完全拘束状態下でのリラクセーション特性を推定することが可能となる。

(2) 剛比が10程度以上であれば、完全拘束条件下で得られる終局緩和量に対する誤差を15%程度以内に抑えることができ、また、完全拘束条件下でのリラクセーション特性を推定する場合でも十分な精度が期待できる。

(3) 材令が進行するに伴い、拘束体と供試体との剛比がリラクセーション試験結果に与える影響は小さくなる。

このような数値シミュレーションから得られた知見により、本研究では、拘束体と供試体の剛比(K_1/K_2)が10以上であれば、実用上十分な精度で引張りリラクセーション実験を行うことが出来ると判断した。

本実験においては、後述のように、断面が10×10cm、長さが86cmのコンクリート供試体を用いているので、弾性係数を $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とすると供試体の変形は0.0287mm/tonとなる。従って、載荷フレームの製作にあたっては、試験時に生じる載荷フレームの変形が、供試体の変形の1/10以下、すなわち、0.002mm/ton以下になるよう図4-11に示すように250×250H型钢および250×90溝型钢の大断面型钢を用いることとした。

4.3.3 実験計画

(1) 実験方法

引張りラクセーション試験においても、載荷材令、載荷ひずみレベルおよび配合の3つを実験因子として取り上げた。載荷材令は、圧縮ラクセーション試験と同じく、1日、3日、7日、14日および21日の5材令とした。供試体に対する引張拘束ひずみの規定についても、圧縮試験と同様、直接的なひずみを用いる方法にかえて、引張強度に対する一定比率の応力により間接的にこれを規定した。引張りラクセーションでは手動によるボルト締め載荷のため、正確な応力レベルのコントロールが困難となり応力レベルにばらつきを生じる。このため、本研究では試験結果を整理するにあたり応力レベルに範囲を設定し、これを引張強度の30%以下、30~60%および60%以上の3レベルとした。配合は、圧縮試験と同様、A配合とB配合の2種類とした。

表4-6に、引張りラクセーション実験各シリーズにおける実験条件をまとめて示す。載荷は、前述のような数値シミュレーション実験をもとに設計、製作された大断面型鋼による載荷フレームを用いた。応力緩和量の検出は、ひずみ導入用ボルトの一部に電気抵抗線ひずみ計を貼付し、その出力をX-Yレコーダに記録することにより行った。実験に際しては、載荷時偏心を小さくするため、載荷フレーム、型枠、定着板の組み立てならびに供試体の作成には万全を期した。これらに加えて、供試体は弾性的に支持されており、また、載荷時に供試体にできるだけ均一なひずみが導入されるよう、供試体中央の4面に貼付した4枚の電気抵抗線ひずみ計の出力を常にモニターできるようになっている。このような配慮により、載荷時における供試体4面でのひずみのばらつきの範囲を 15μ 以下に抑えることができた。

(2) 供試体

供試体は、 $10\times 10\times 86\text{cm}$ の角柱供試体を用いた。各供試体は試験直前まで温度 20°C 、湿度90%以上の恒温室内で養生を行なった。また、載荷試験も同じ恒温室内で実施した。載荷にあたり、引張強度試験を行い、これらの強度実測値をもちいて供試体への載荷応力の値を決定した。なお、各材令の引張強度は、材令1日は直接引張試験から、その他の材令については割裂引張試験により決定した。表4-4に、各材令での引張強度を示す。供試体作成に用いたコンクリート用材料は、圧縮試験用コンクリートと同一のものである。

4. 3. 4 実験結果および考察

(1) 引張りラクセーション特性に及ぼす載荷応力レベルの影響

図4-19~4-23に、A配合コンクリートの、載荷材令1, 3, 7, 14, および21日における各応力レベルに対する引張りラクセーション試験結果を示す。各図に示すように、各実

験結果とも極めて安定したリラクセーション曲線が得られており、本研究で採用した高剛性載荷フレームによる試験システムにより、若材令コンクリートの引張りリラクセーション試験を精度良く実施することが可能であると考えられる。さて、引張りリラクセーション特性の全般的な特徴として、圧縮下の特性よりもさらに短期終結性であり、しかも、終局緩和量もかなり少ないことなどが注目される。すなわち、いずれの載荷材令においても載荷後2～3時間程度でほぼ応力緩和挙動が終了し、終局緩和量も載荷材令1日では約25%、その他の材令では15%程度にとどまっている。ここで、各載荷材令における載荷応力レベルの影響に注目すると、いずれの材令においても応力緩和特性に対する載荷応力レベルの影響は認められない。たとえば、図4-19から、載荷材令1日では載荷応力レベルが30～80%の範囲で変化しても終局緩和量は26～29%の範囲内にあり、また1/2緩和時間も0.37時間程度である。以上のことから、圧縮下の特性と同様、少なくとも引張強度の80%程度の範囲内では、引張りリラクセーション特性の載荷応力に対する線形則が成立すると考えて大きな誤りはないものと考えられる。

(2) 引張りリラクセーション特性に及ぼす載荷材令の影響

表4-7に、各載荷材令における終局緩和量と1/2緩和時間の範囲を示す。引張りリラクセーション特性におよぼす載荷材令の影響に注目すると、図4-19～4-23ならびに表4-7から、載荷材令3日以降は材令が変化しても引張りリラクセーション曲線はほとんど変化せず、終局緩和量は13～16%の範囲内、また、1/2緩和時間は3.3時間程度である。従って、材令3～21日の範囲内ではリラクセーション特性はほぼ一定と考えてよいことがわかる。一方、載荷材令1日では他の材令に比較して、1/2緩和時間においては明瞭な差異は認められないものの、終局緩和量は10%程度大きくなる傾向にある。

(3) 引張りリラクセーション特性に及ぼす配合の影響

図4-24、4-25に、載荷応力レベルを同一とした場合のA配合とB配合のコンクリートそれぞれの、載荷材令3日と21日における引張りリラクセーション曲線を示す。図4-24から、載荷材令3日でのA配合コンクリートの終局緩和量は平均14%、また、1/2緩和時間は平均0.27時間となっている。一方、B配合コンクリートでは、それぞれ、平均13%および平均0.78時間となっている。すなわち、引張りリラクセーション特性の終局緩和量においては、A配合とB配合コンクリートの間にはほとんど差異は認められない。一方、1/2緩和時間については、B配合コンクリートの方が平均値としては大きい値を示したがばらつきが著しく、本研究の範囲内では、A配合コンクリートとB配合コンクリートとの間において明確な差異は認められない。

図4-25から、載荷材令21日では、A配合コンクリートの終局緩和量は12～19%、一方、B配合コンクリートでは10～16%で、載荷材令3日と同様、A配合コンクリートとB配合コン

リートの間にはほとんど差異は認められない。

以上のように、载荷応力レベルが同一の場合、引張りラクセーション特性におよぼす配合の影響はほとんど認められず、図4-24、4-25に示すように、全体的なりラクセーション曲線はほとんど変化しないことが明らかとなった。

(4) 引張りラクセーション特性の評価法

図4-19～4-23の各図中に実線で示されたラクセーション関数は、圧縮下の特性と同様、最小自乗法により求めたものであるが、各図から、いずれの材令においても実験値とラクセーション関数とは良く合致しており、従って、引張りラクセーション関数として、式(4-1)に示す圧縮下におけるラクセーション関数と同型の実験式を用いることが可能であると考えられる。つぎに、図4-26、4-27には、全ての実験結果に対するラクセーション関数中の定数A、ならびにCの値と载荷材令との関係を、片対数紙上で示したものである。図から、材令の増加に伴う定数AならびにCの変化は、圧縮下の特性と比較して小さいことがわかる。定数Aは、定数Cに比べてばらつきも大きく材令との相関は明確ではないが、この場合、これをばらつきの範囲内で一定と考えても大きな誤りはないものと考えられる。定数Cについても、材令3日以降はほぼ一定値を示す傾向が認められる。圧縮下の特性と同様、定数A、Cと材令との関係を最小自乗法により決定した結果を、式(4-9)、(4-10)ならびに図4-22、4-23に示す。

$$A=0.32 \quad (4-9)$$

$$C=0.10 \ln t + 0.39 \quad (t < 72\text{hr}) \quad (4-10a)$$

$$=0.85 \quad (t \geq 72\text{hr}) \quad (4-10b)$$

以上、引張りラクセーション実験結果とその解析により、任意材令の引張りラクセーション特性を、式(4-1)ならびに式(4-9)、(4-10)により評価することが可能となった。

4.4 圧縮ラクセーション特性と引張りラクセーション特性の比較

圧縮ラクセーション特性と引張りラクセーション特性とを比較するため、図4-28～30および表4-8に、载荷材令1、7および21日における载荷応力レベル約50%での圧縮下の特性と引張下の特性とを合わせて示す。まず終局緩和量に注目すると、全ての材令において、圧縮下での終局緩和量は引張下の特性に比べかなり大きいことがわかる。各材令における終局緩和量は、表4-8に示すように、引張下では圧縮下の0.27～0.4倍程度となっており、材令が小さいほ

ど両者の差が大きくなる傾向を示している。また、 $1/2$ 緩和時間は、各材令とも引張下では圧縮下の $0.01 \sim 0.04$ 程度の値となっている。以上の比較から、引張りラクセーション挙動は、圧縮下の挙動にくらべ極めて短期終結性でラクセーション量もかなり小さくなることがわかる。さて、圧縮下の特性と引張下の特性とを全体的に見た場合、両者はかなり様相を異にするのであるが、今、載荷後1時間以内の極く初期、すなわち応力緩和が急速に進行する期間に注目すると、両者の緩和挙動がほぼ合致している点が興味深い。すなわち、載荷材令1日では、載荷後1時間における緩和量は圧縮、引張とも20%程度、載荷材令7日と21日では、いずれも10%程度となっている。このように、載荷1時間までは圧縮、引張ともほぼ同様な緩和挙動を示すが、その後、圧縮下では緩和速度がやや緩慢とはなるものの引続き緩和が進行するのに対し、引張下ではまもなく緩和がほぼ終了する。このような圧縮ラクセーションと引張りラクセーションの相違に関して、次のような推論が成り立つ。すなわち、コンクリートのクリープならびにラクセーションは、セメントゲル水の圧出（シーページ）、ゲル粒子の粘性流動および粒子間のすべりさらにはマイクロクラックの発生等に起因する現象と考えられる。西林は、クリープがコンクリートの種類、応力あるいは載荷材令に影響されるのは、それぞれにおけるシーページ効果が異なるためであると述べている⁽¹⁴⁾。そこで、本研究で得られたような圧縮ラクセーションと引張りラクセーションの相違について、圧縮下と引張下では上で述べたいくつかのラクセーションの発生機構のうち、支配的となる要因がそれぞれことなるため両者における全般的な緩和挙動に違いが現れるものと解釈することができる。

4. 5 クリープデータを用いたラクセーション特性の推定

コンクリートのクリープ特性からラクセーション特性の推定を試みた研究は、今まで幾つか報告されているが、これらにおける基本的な考え方はいずれも同様で、クリープ特性を用いたコンクリート構成式を基本とし、これにラクセーション試験に相当するひずみ一定条件を適用することによりラクセーション特性を誘導するもので、たとえば履歴理論により導かれた構成式は積分方程式の形をとるので、これを解くことによりラクセーション特性を推定することができる。これに対して Hansen は、簡単なコンクリート構成式を基本としたラクセーション推定法を提案している⁽¹⁵⁾。また、Trost もコンクリート構成式を簡単な代数式で表現することを提案しており⁽¹⁶⁾、この構成式をもとにラクセーション特性を推定することが可能である。そこで、本節では、Trost の変形式ならびに Hansen の手法の、若材令コンクリートのラクセーション特性推定法への適用性を明らかにするため、本章4. 2で得られた圧縮ラクセーション特性をこれらの手法によりクリープデータから推定した結果について述べる。

4. 5. 1 リラクセーション特性の簡易推定法

(1) Trost の変形式⁽¹⁶⁾

Trost は、変動応力 σ_t が作用した時の経時変形 ε_t を、次のような代数式で表すことを提案した。

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_b} [\sigma_0 (1 + \varphi_t) + (\sigma_t - \sigma_0) \cdot (1 + \rho \cdot \varphi_t)] + \varepsilon_{st} \quad (4-11)$$

ここで、 E_b : 弾性係数

σ_0 : $t=0$ の時の応力

σ_t : 時間 t における応力

φ_t : 時間 t におけるクリープ係数

ε_{st} : 時間 t における乾燥収縮ひずみ

ρ : クリープひずみ低減係数 (リラクセーション係数)

上式において、 $t=0$ の時の変形 $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E_b = \text{一定}$ とし、同様に $\varepsilon_{st} = 0$ とすれば、

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_b} [\sigma_0 (1 + \varphi_t) + (\sigma_t - \sigma_0) \cdot (1 + \rho \cdot \varphi_t)] = \frac{\sigma_0}{E_b} = \text{一定} \quad (4-12)$$

が得られる。

式(4-12)を整理すると、リラクセーション関数として次式が得られる。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_0} = 1 - \frac{\varphi_t}{1 + \rho \varphi_t} \quad (4-13)$$

式中のリラクセーション係数の値については、Rusch の提案⁽¹⁷⁾を参考にして $\rho = 0.8$ と仮定した。

(2) Hansen の方法⁽¹⁵⁾

時間 t_0 において、弾性ひずみ ε_0 を供試体に導入した時、供試体に発生する初期応力 σ_0 は次式で表される。

$$\sigma_0 = E \varepsilon_0 \quad (4-14)$$

時間 t_0 から時間 t までに生じるクリープひずみ ε_c が、弾性ひずみを解放するものと仮定すれば、時間 t において残留する弾性ひずみ ε_t 、および、供試体中の残留応力 σ_t はそれぞれ

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 - \varepsilon_c \quad (4-15)$$

$$\sigma_t = E \varepsilon_t \quad (4-16)$$

となる。ここで、 ε_c は導入応力が σ_0 から σ_t へと減少していく間に生じるクリープひずみであるが、これを近似的に次式によって評価できることを仮定する。

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_0 + \sigma_t}{2} \cdot \frac{\varepsilon_c'}{\sigma_0} \quad (4-17)$$

ここで、 ε_c' は一定応力 σ_0 により、時間 t_0 から時間 t までの間に生じるクリープひずみである。式(4-17)を式(4-15)に代入すると次式が得られる。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 - \frac{\sigma_0 + \sigma_t}{2\sigma_0} \varepsilon_c' \quad (4-18)$$

一方、

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \sigma_t \quad (4-19)$$

が成立するので、式(4-19)を式(4-18)に代入して、次のようなりラクセーション関数が得られる。

$$\frac{\varepsilon_0 \sigma_t}{\sigma_0} = \varepsilon_0 - \frac{\sigma_0 + \sigma_t}{2\sigma_0} \varepsilon_c' \quad (4-20)$$

あるいは、

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{2\varepsilon_0 - \varepsilon_c'}{2\varepsilon_0 + \varepsilon_c'} \quad (4-21)$$

本研究では、式(4-21)にクリープ係数 φ_t を導入した次式を用いた。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{2 - (\varepsilon_c' / \varepsilon_0)}{2 + (\varepsilon_c' / \varepsilon_0)} = \frac{2 - \varphi_t}{2 + \varphi_t} \quad (4-22)$$

4.5.2 リラクセーション特性の推定

(1) クリープデータ

Trost の変形式ならびに Hansen の手法により圧縮リラクセーション特性を推定するにあたり、リラクセーション特性推定の基本データとなる、クリープ特性を得るための実験を実施した。圧縮クリープ実験に用いたコンクリートの配合、載荷材令、ならびに供試体の養生方法は、全て4.2で述べたA配合コンクリートに対する圧縮リラクセーション実験と同一である。供試体は、寸法が15×15×53cmの直方体で、中心部長手方向にひずみ検出用の埋め込みゲージが設置されている。載荷装置は、電子式負荷制御装置付き万能試験の応力制御モード（負荷応力一定制御）を用いて実施した。また、供試体への導入応力は、圧縮強度の30%とした。なお、クリープ実験は載荷材令14日を除いて、各材令とも2回以上実施した。

図4-31～4-35に、載荷材令1, 3, 7, 14および21日でのクリープ実験結果を示す。各図の縦軸はクリープ係数 $\varphi_t (= \varepsilon_t / \varepsilon_0)$ である。各図から、載荷後200時間におけるクリープ係数 $\varphi_{t=200}$ の値に注目すると、載荷材令1日では1.2～1.6、載荷材令3日では1.0～1.3、以下同様に、7日、14日、および21日に対しては、1.0, 0.7, および0.6～0.8となっており、載荷材令の増加に伴いクリープ係数が減少していくことがわかる。また、クリープの進行速度も載荷材令の増加につれて小さくなっていく。

さて、各載荷材令における平均的なクリープ特性を評価するために、本研究では、次式のクリープ関数⁽¹³⁾を用いた。

$$\varphi_t = k \cdot \ln(t+1) \quad (4-23)$$

ここで、 t ：載荷時間

k ：実験定数

なお、式(4-23)において、 $t = \infty$ とすると $\varphi_t = \infty$ となり明らかに不合理であるが、本研究では $t \leq 200\text{hr}$ 程度の範囲を対象としており、その範囲内において実験値と最も適合性のよい式(4-23)をクリープ関数として用いることにした。

表4-9に、実験値に最小二乗法を適用して算定した、クリープ関数中の実験定数 k の平均値を示す。図4-31～4-35の各図中に、各載荷材令における定数 k の平均値を用いたクリープ関数の値を実線にて示す。各図から、各載荷材令とも式(4-23)のクリープ関数は各実験値の平均的な値を与えており、これを、各載荷材令におけるクリープ特性評価式として用いても実用上大きな問題はないものと考えられる。

(2) リラクセーション特性の推定結果および考察

図4-36～4-40に、各載荷材令における Trost の変形式と Hansen の方法によるリラクセーション関数推定結果を、リラクセーション実験値と合わせて示す。各図から、Trost の変形式と Hansen の方法を比較すると、両手法の与える応力緩和曲線は定性的には良く合致しているが、全ての載荷材令において Hansen の方法の方が大きな緩和量を与えている。実験値との対応では、載荷材令1日を除き、全般的に推定値の方が実験値よりも大きな緩和量を与えているが、Trost の変形式によるリラクセーション推定値の方が実験値に近い値を与えている。すなわち、推定値と実験値との差は、Trost の変形式では $\pm 10\%$ 程度、一方、Hansen の方法では $\pm 15\%$ 程度になっている。載荷材令1日においては、両推定値とも実験値と大きく異なる緩和特性を与えている。すなわち、両推定手法とも実験による緩和曲線と大きく異なる結果を与えており、終局緩和量も実験値に比べてかなり小さな値を与える傾向にあることがわかる。

以上の結果から、若材令コンクリートのリラクセーション特性の推定法として Trost の変形式と Hansen の方法を比較した場合、載荷材令1日を除き、Trost の変形式による推定値は実験値に対する差が $\pm 10\%$ 以内に収まり、比較的良好な結果を与えることが明らかとなった。一方、載荷材令1日では、両手法とも実験値と大きく異なる結果を与えることから、Trost の変形式でも載荷材令1～3日の極く初期の材令においては、その適用が困難であると考えられる。

4.6 まとめ

本章では、コンクリート構造物の温度応力解析などにおいて重要となる、若材令コンクリートの圧縮ならびに引張ひずみ拘束下でのリラクセーション特性と、これら及ぼす載荷材令、載荷ひずみ(応力)レベルおよびコンクリート配合の影響を明らかにした。そして、得られたリラクセーション実験データをもとに、圧縮ならびに引張りリラクセーション特性に対する評価式の提案を

行った。さらに、本章では、リラクセーション試験における拘束の程度が実験結果に及ぼす影響、および、クリープデータからのリラクセーション特性の簡易推定法の実用性などについても検討を行った。本章で得られた研究成果をまとめると次のようになる。

(1) 載荷材令1日における終局緩和量は、圧縮下で平均95%、引張下で平均26%となった。同様に、載荷材令3日では、それぞれ63%ならびに14%、載荷材令7日では、45%ならびに15%、載荷材令14日では、35%ならびに13%、そして、載荷材令21日では、40%ならびに16%となった。一方、1/2緩和時間は、圧縮下で5~30時間、引張下では平均0.34時間程度の値となった。

(2) コンクリートのリラクセーション挙動は、これと表裏をなすクリープ挙動に比べてかなり短期終結性である。すなわち、圧縮リラクセーションの場合、載荷後1時間以内で全緩和量の25~40%程度が速やかに進行し、その後は次第に緩慢となり載荷後約100時間でほぼ最終的な緩和量に達する。一方、引張リラクセーションは更にこの傾向が著しく、載荷後2~3時間でほぼ最終的な緩和量に達する。

(3) 引張リラクセーションにおける終局緩和量は圧縮リラクセーションの0.27~0.4倍、また1/2緩和時間は0.01~0.04倍程度の値を示す。すなわち、引張リラクセーションは圧縮リラクセーションにくらべ極めて短期終結性で、応力緩和量もかなり少ない。

(4) 載荷後1時間までの、応力緩和が急速に進行する期間における応力緩和量は、圧縮下、引張下ともほぼ同様な値となる。そして、それ以降、圧縮下では引き続き徐々に応力緩和が進行するのに対し、引張下ではまもなく応力緩和が停止する。

(5) 圧縮ならびに引張リラクセーションの終局緩和量とリラクセーションの1/2緩和時間あるいは終結時間は共に載荷材令の影響を受け、材令が進行するに伴い終局緩和量は小さくなり、終結時間は短くなる。しかし、引張リラクセーション特性におよぼす載荷材令の影響は、圧縮リラクセーション特性に比べ小さい。

(6) 載荷応力レベルが、少なくとも圧縮強度の80%あるいは引張強度の80%以下の範囲内では、応力緩和率は載荷応力にかかわらずほぼ一定である。

(7) 載荷応力レベルを同一とした場合、水セメント比および単位セメント量が圧縮リラクセーション特性におよぼす影響は小さい。一方、引張リラクセーション特性においては配合の影響は

ほとんど認められない。

(8) 若材令コンクリートのリラクセーション関数として、圧縮、引張とも式(4-1)のような双曲線型の実験式を適用することができる。そして、式中の実験定数は、式(4-4)，(4-5) および、式(4-9)，(4-10)のように載荷材令の関数として求める事ができ、これらの評価式により、任意材令の圧縮ならびに引張りリラクセーション特性を評価する事が可能である。

(9) リラクセーション試験における拘束体と供試体の剛比は、終局緩和量に影響を与えるが、緩和率の進行にはほとんど影響を及ぼさない。そして、剛比が10程度以上であれば、実用上十分な精度でリラクセーション実験を行うことができる。

(10) Trost の変形式を用いて、クリープデータから若材令コンクリートのリラクセーション特性を、実測値との誤差±10%程度の精度で推定することができる。ただし、載荷材令3日以前の極く初期の材令では、誤差がかなり大きくなりその適用が困難となる。

(参考文献)

- (1) Douglas McHenry: A New Aspect of Creep in Concrete and its Application to Design, Proc. , ASTM, Vol.43, pp. 1069~1043, 1943
- (2) J. M. Raphael: The Development of Stresses in Shasta Dam: Tran. , ASCE, Vol. 118, pp. 289~309, 1952
- (3) R. W. Carlson and D.P. Thayer: Surface Cooling of Mass Concrete to Prevent Cracking, Jour. ACI, Proc. , Vol. 29, pp. 107~120, 1959
- (4) L. Kh. Arutyunyan: Some Problems in the Theory of Creep in Concrete Structures, Pergamon Press, 1966
- (5) 君島 博次: ダムコンクリートのクリープに関する研究(第2部)ー実在ダムにおける応用に関する研究, 電力中央研究所, 技術研究所所報, 第10巻, 第5, 6号, pp. 47~97, 1960
- (6) 河合 敦, 平田正成, 小柳 洽, 森本博昭: 若材令コンクリートの引張りリラクセーション特性について, 土木学会第41回年次学術講演会概要集, pp. 375~376, 1986
- (7) 平田正成, 河合 敦, 森本博昭, 小柳 洽: 若材令コンクリートのリラクセーション特性評価法に関する研究, 土木学会第41回年次学術講演会概要集, pp. 377~378, 1986

- (8) 平田正成, 河合 敦, 森本博昭, 小柳 治: 温度応力解析における若材令コンクリートのリラクセーション特性について, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 37~40
1986
- (9) 森本博昭, 平田正成, 小柳 治: 若材令コンクリートのリラクセーション特性とその評価法に関する研究, 土木学会論文集, 第396号/V-9, pp. 59~68, 1988
- (10) 奥田隆之, 坂口 進, 森本博昭, 小柳 治: コンクリートのリラクセーション特性におよぼす配合の影響について, 昭和63年度土木学会中部支部研究発表会概要集, 1989
- (11) 西林新蔵, 木山英郎: コンクリートの応力緩和に関する一研究, 土木学会論文報告集, 214号, pp. 145~153, 1975
- (12) 木山英郎, 西林新蔵, 井上正一, 北村安朗: コンクリートの引張緩和現象に関する一考察, 鳥取大学工学部研究報告, 第7巻, pp. 75~84, 1976
- (13) A. M. Neville: Properties of Concrete, Pitman Publishing, 1977
- (14) 西林新蔵: 人工軽量骨材コンクリートのクリープに関する研究, コンクリートジャーナル, Vol. 7, No. 1, pp. 2~10, 1969
- (15) Torben C. Hansen: Estimating Stress Relaxation from Creep Data, Materials Research & Standards, Proc. , Vol. 4, No. 1, pp. 12~14, 1964
- (16) H. Trost: Spannungs-Dehnungs-Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgerungen für Stabtragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, beton 1966, H. 6.
- (17) H. Rusch, D. Jungwirth, 百島祐信訳: コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1976
- (18) たとえば, 君島博次: ダムコンクリートのクリープの基礎的研究とその応用結果について, 土木学会論文集, 第72号, pp. 23~30, 1961

表4-1 コンクリートの示方配合（A配合）

スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)			
				C	W	S	G
15	1.5	50	44	346	173	793	996

表4-2 コンクリートの示方配合（B配合）

スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)			
				C	W	S	G
8	1.5	60	42	272	163	771	1079

表4-3 圧縮リラクセーション実験条件

供試体		載荷材令 (day)	載荷 応力レベル(%)
A 配合	B 配合		
C1D30A	—	1	30
C1D50A	—	1	50
C1D80A	—	1	80
C3D30A	—	3	30
C3D50A	C3D50B	3	50
C3D80A	—	3	80
C7D30A	—	7	30
C7D50A	—	7	50
C7D80A	—	7	80
C14D50A	—	14	50
C21D50A	C21D50B	21	50

表4-4 コンクリートの力学的特性

材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		引張強度 (kgf/cm ²)		弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	
	A 配合	B 配合	A 配合	B 配合	A 配合	B 配合
1	44	—	4.3	—	1.00	—
3	177	105	15.7	12.1	2.00	1.55
7	280	—	23.3	—	2.40	—
21	361	290	26.4	19.9	2.90	2.70
28	388	337	28.3	22.7	2.95	2.75

表 4-5 圧縮リラクセーション特性におよぼす載荷材令の影響

載荷材令 (日)	1 / 2 緩和時間 (時間)	終局緩和量 (%)	終局残留応力比 (%)
3	10~14	60~65	35~40
7	5~15	40~50	50~60
14	7~8	30~40	60~70
21	7~15	35~45	55~65

表 4-6 引張りリラクセーション実験条件

供試体		載荷材令 (day)	載荷 応力レベル(%)
A 配合	B 配合		
T1D60A	—	1	30~60
T1D80A	—	1	60~80
T3D30A	—	3	0~30
T3D60A	T3D60B	3	30~60
T7D60A	—	7	30~60
T7D80A	—	7	60~80
T14D60A	—	14	30~60
T14D80A	—	14	60~80
T21D30A	—	21	0~30
T21D60A	T21D60B	21	30~60
T21D80A	—	21	60~80

表 4-7 引張りリラクセーション特性におよぼす載荷材令の影響

載荷材令 (日)	1 / 2 緩和時間 (時間)	終局緩和量 (%)
1	0.37	26
3	0.22	14
7	0.48	15
14	0.30	13
21	0.32	13

表4－8 圧縮リラクセーションと引張リラクセーション

載荷材令 (日)	1 / 2 緩和時間 (時間)		終局緩和量 (%)	
	圧縮下	引張下	圧縮下	引張下
1	7~28	0.3	95	26
7			45	14
21			40	16

表4－9 実験定数kの値

材 令	k
1 日	0.269
3 日	0.217
7 日	0.176
14 日	0.128
21 日	0.113

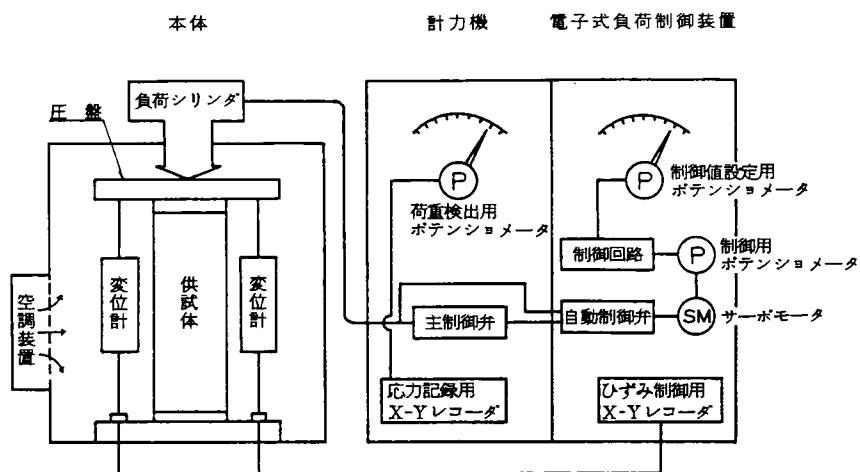


図4-1 圧縮リラクセーション試験装置

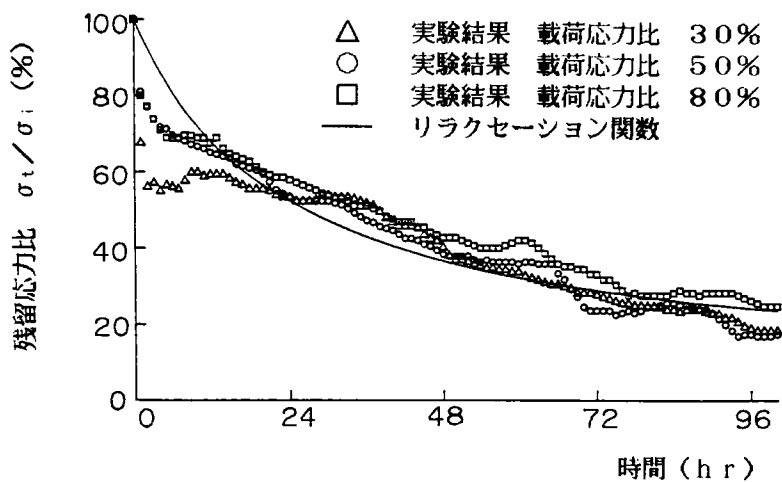


図4-2 圧縮リラクセーション曲線（材令1日）

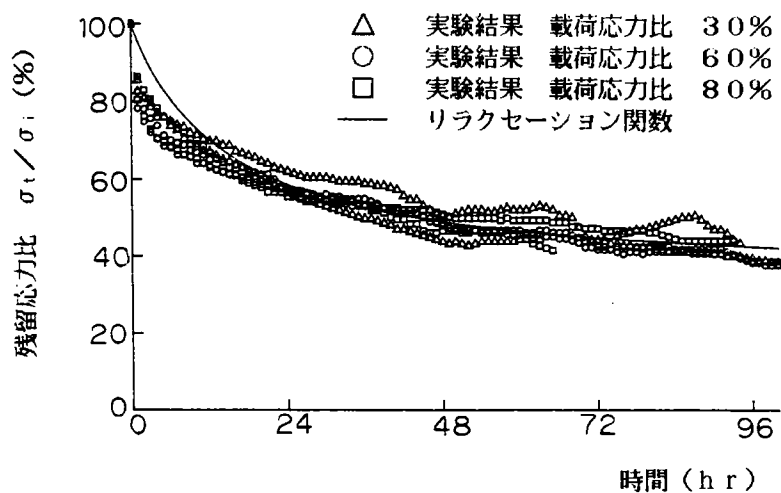


図4-3 圧縮リラクセーション曲線 (材令3日)

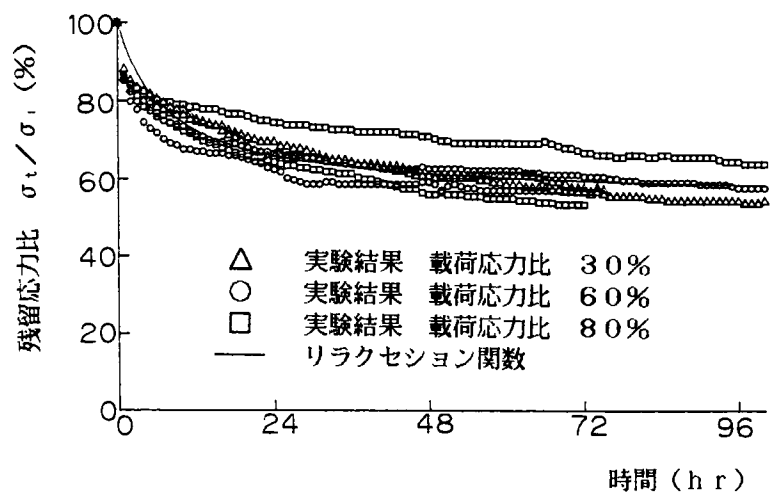


図4-4 圧縮リラクセーション曲線 (材令7日)

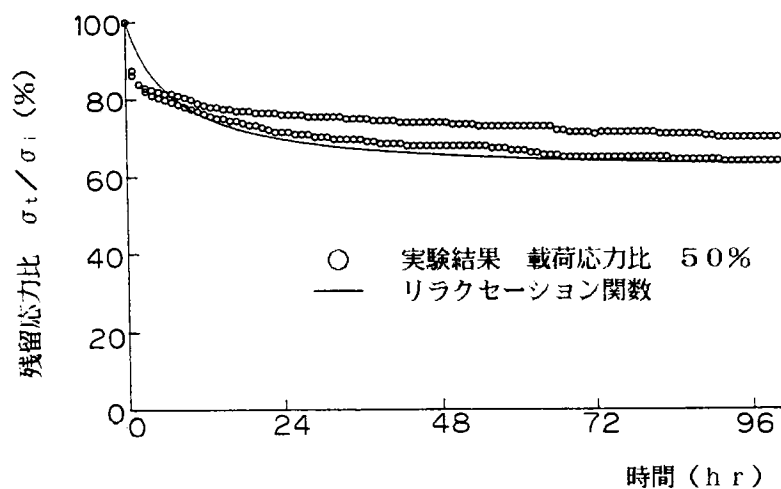


図4-5 圧縮リラクセーション曲線 (材令14日)

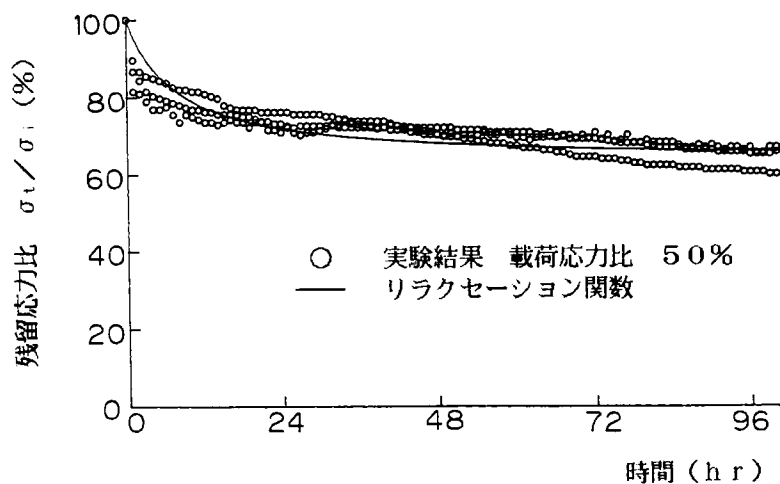


図4-6 圧縮リラクセーション曲線 (材令21日)

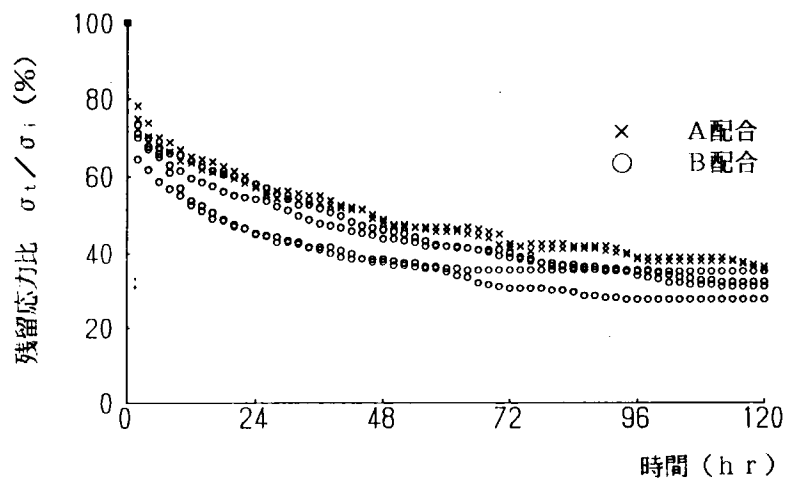


図4-7 圧縮リラクセーションに及ぼす配合の影響（載荷材令3日）

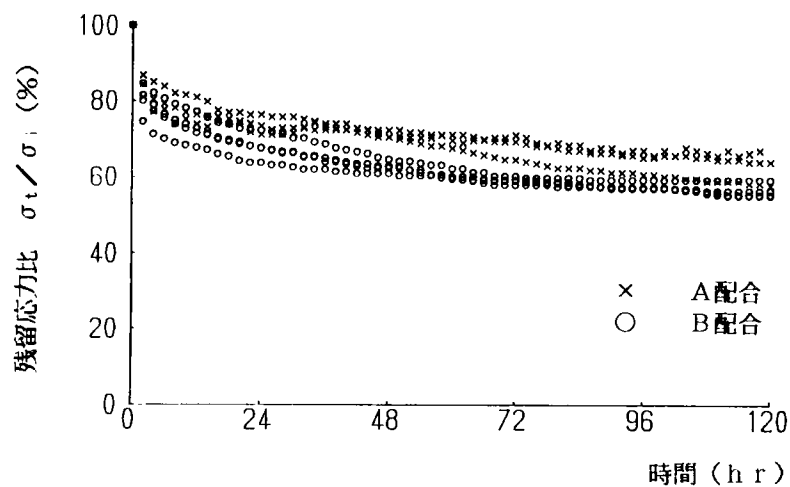


図4-8 圧縮リラクセーションに及ぼす配合の影響（載荷材令21日）

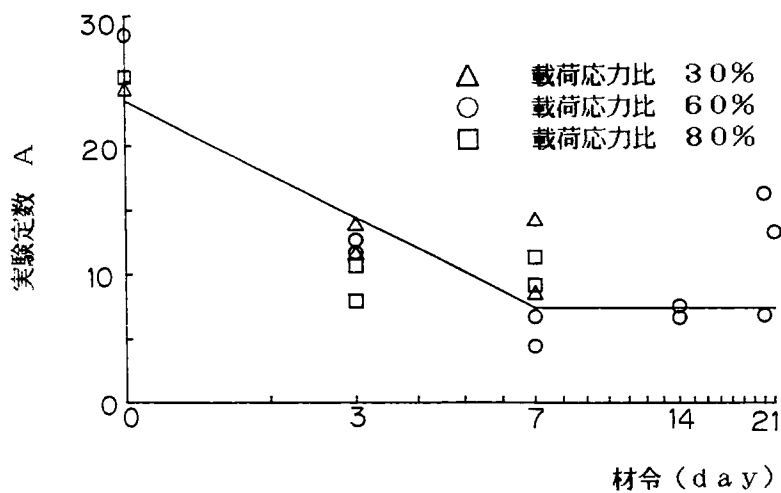


図4-9 材令と実験定数Aの関係

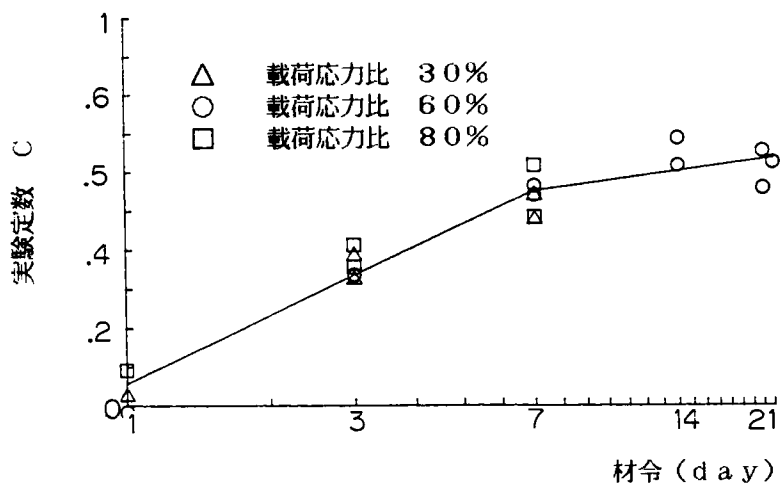


図4-10 材令と実験定数Cの関係

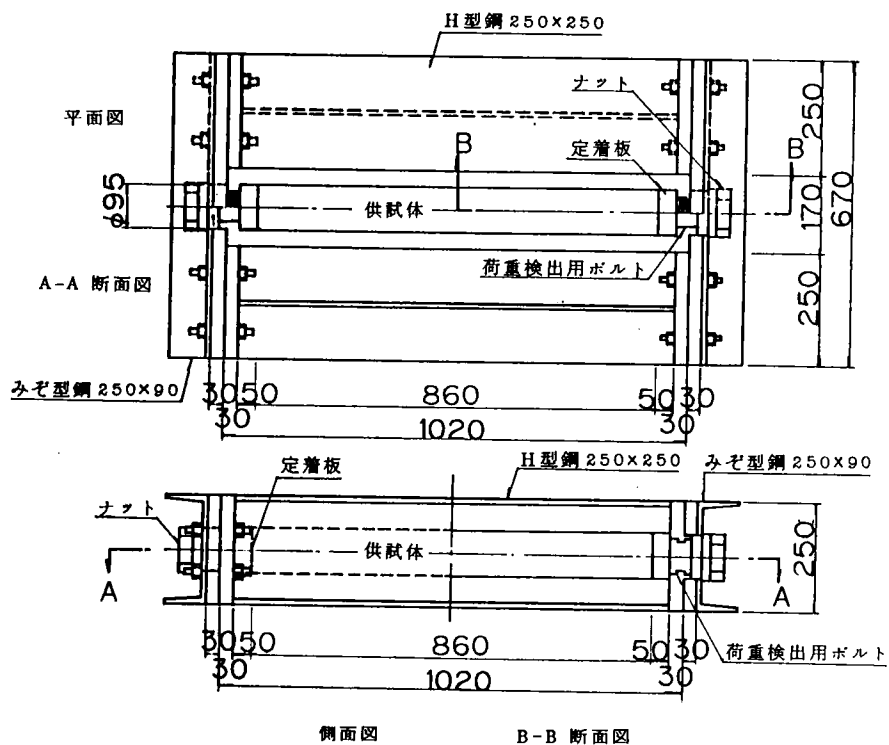


図4-11 引張りラクセーション試験装置

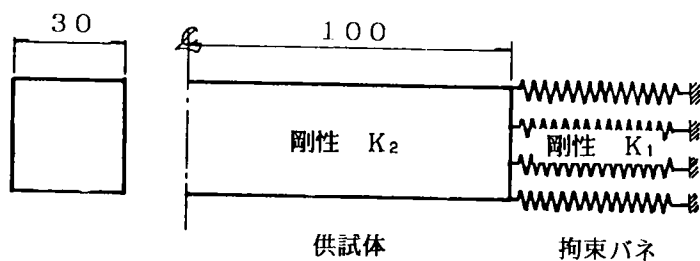


図4-12 解析モデル

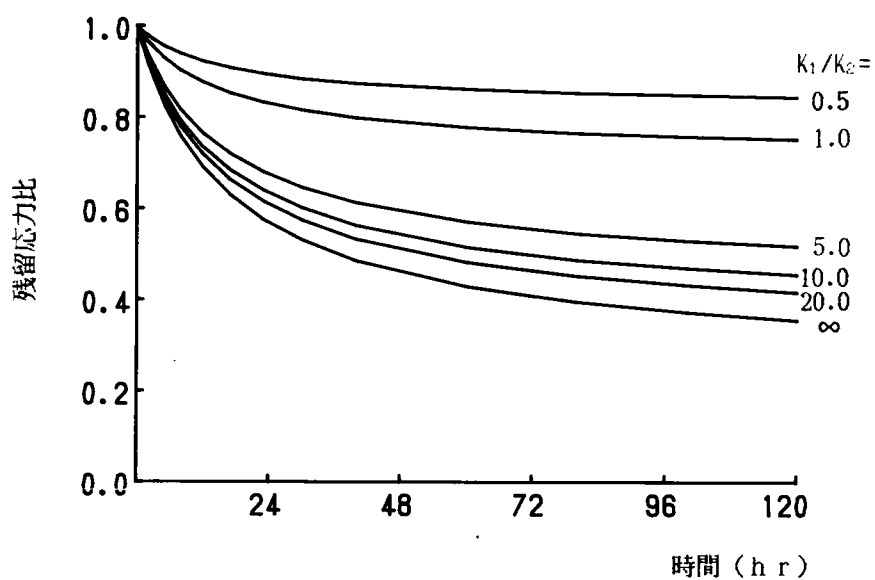


図4-13 シミュレーション結果 (材令3日)

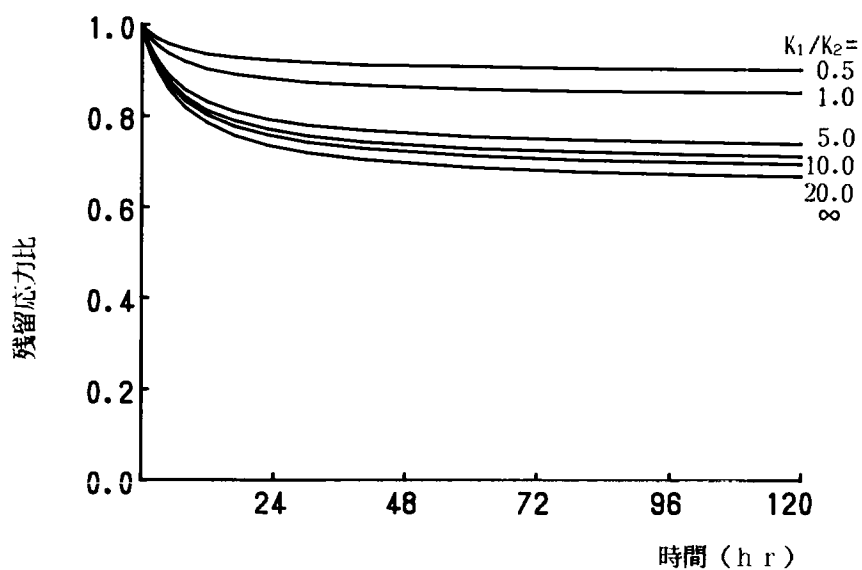


図4-14 シミュレーション結果 (材令28日)

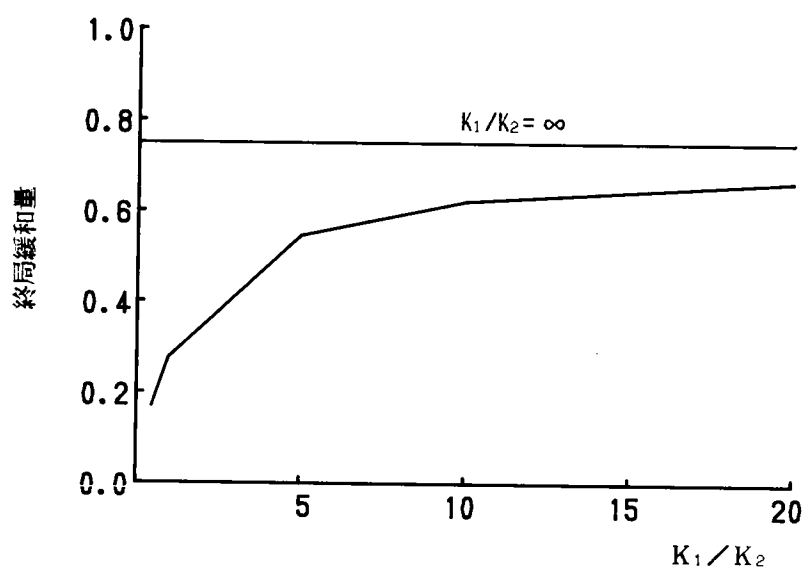


図4-15 剛比と終局緩和量 (材令3日)

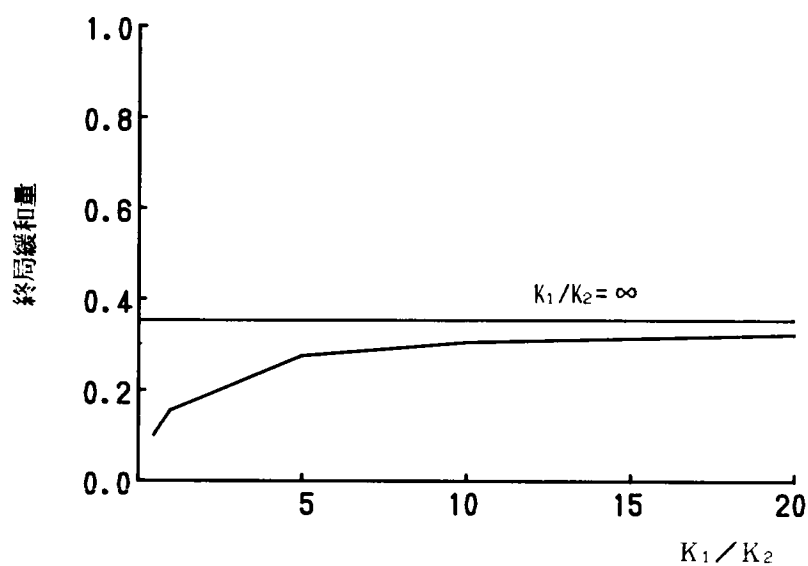


図4-16 剛比と終局緩和量 (材令28日)

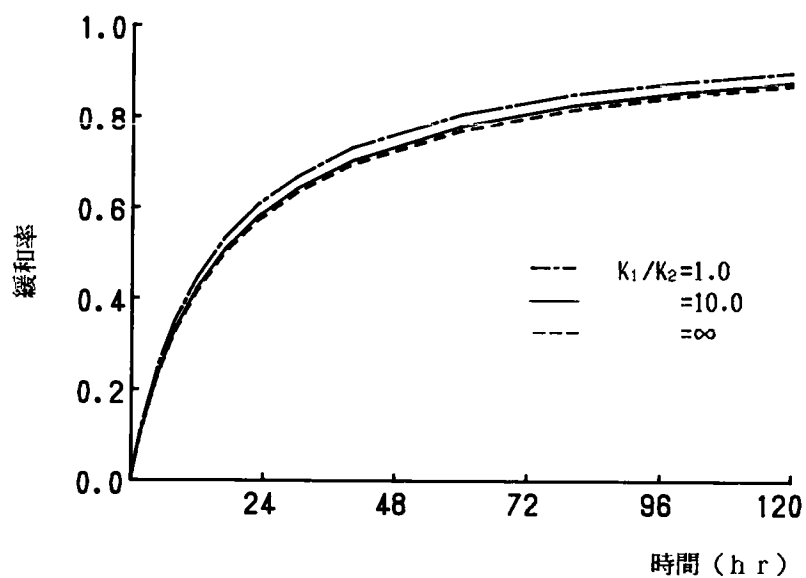


図4-17 緩和率の進行 (材令3日)

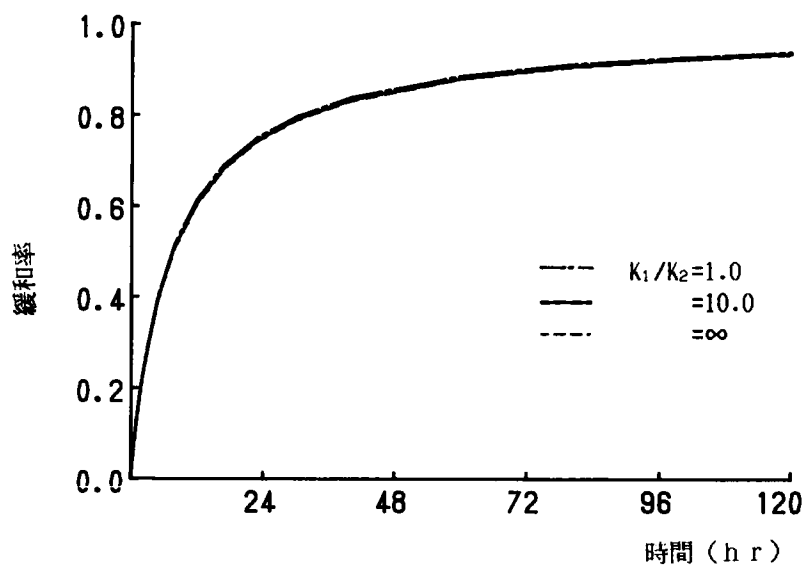


図4-18 緩和率の進行 (材令28日)

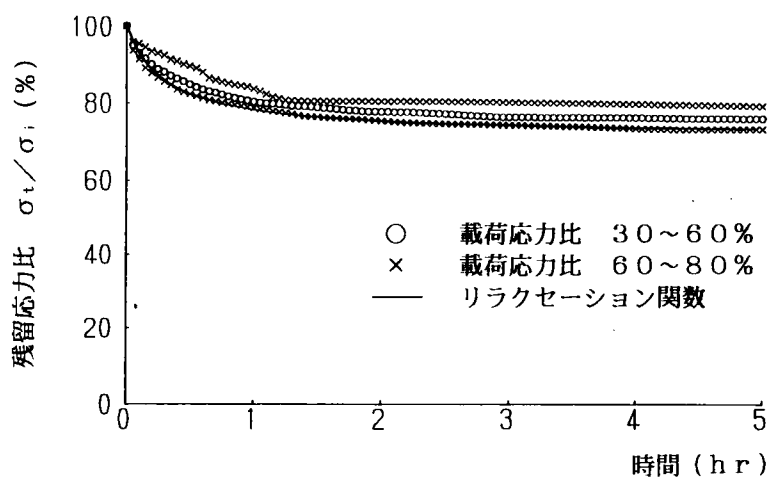


図4-19 引張りラクゼーション曲線 (材令1日)

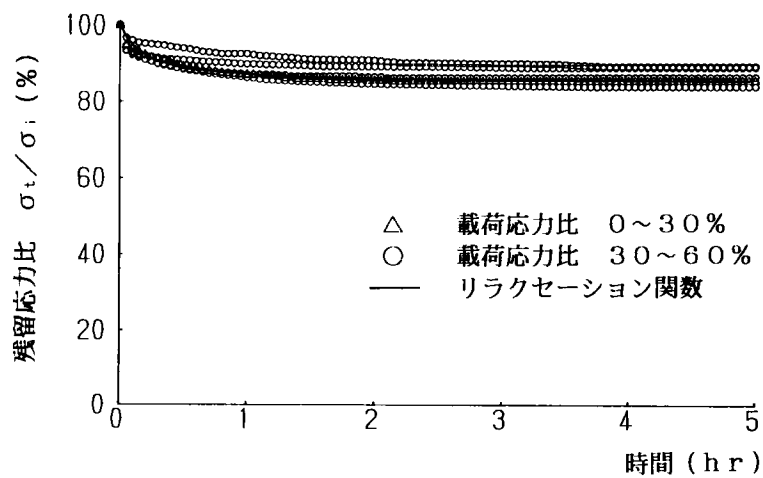


図4-20 引張りラクゼーション曲線 (材令3日)

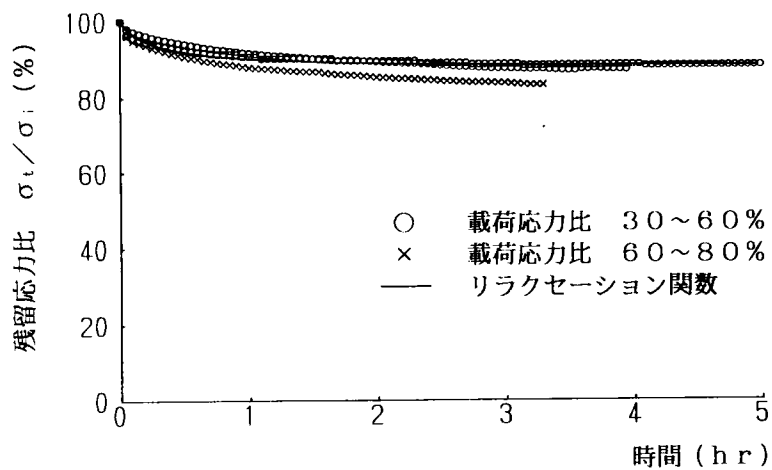


図4-21 引張りラクセーション曲線 (材令7日)

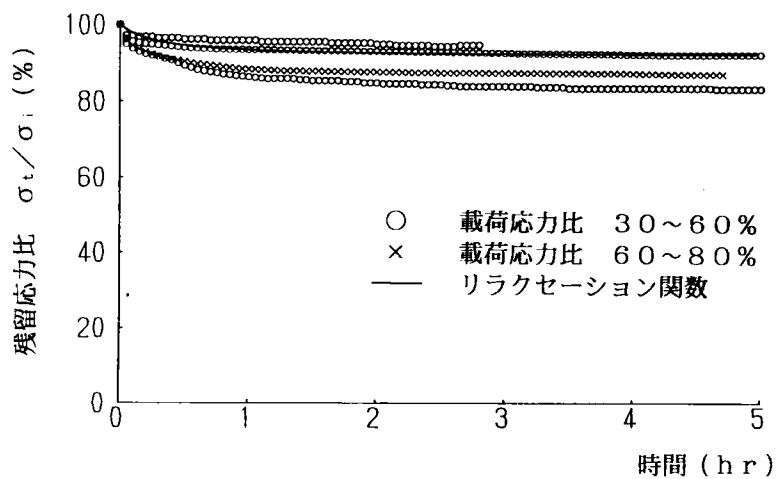


図4-22 引張りラクセーション曲線 (材令14日)

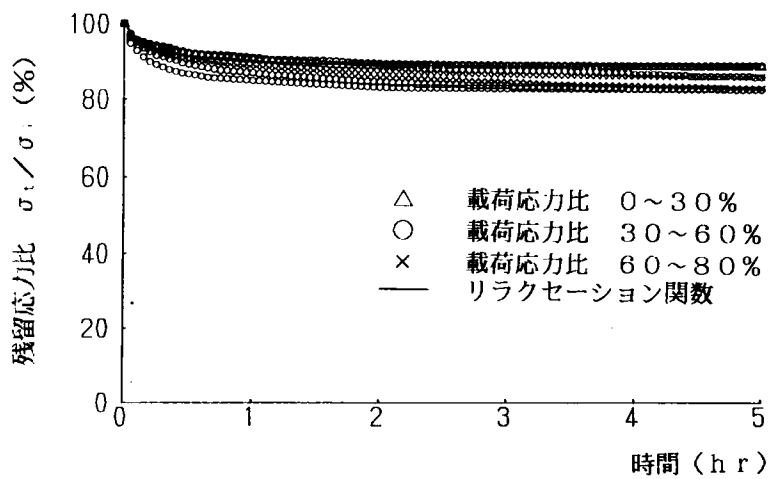


図4-23 引張りラクゼーション曲線 (材令21日)

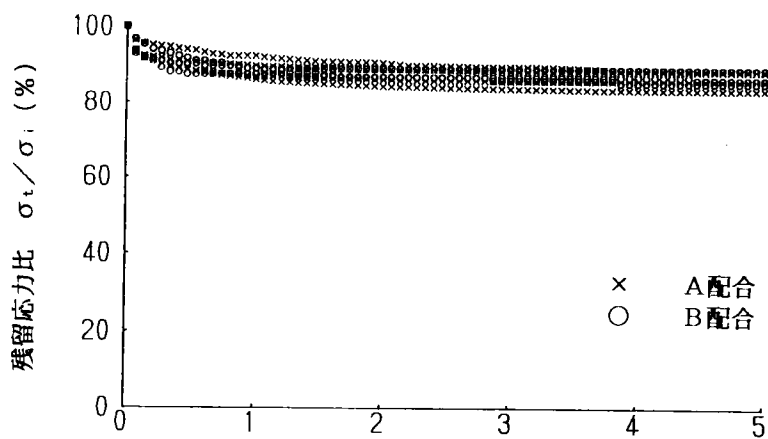


図4-24 引張りラクゼーションに及ぼす配合の影響 (荷重材令3日)

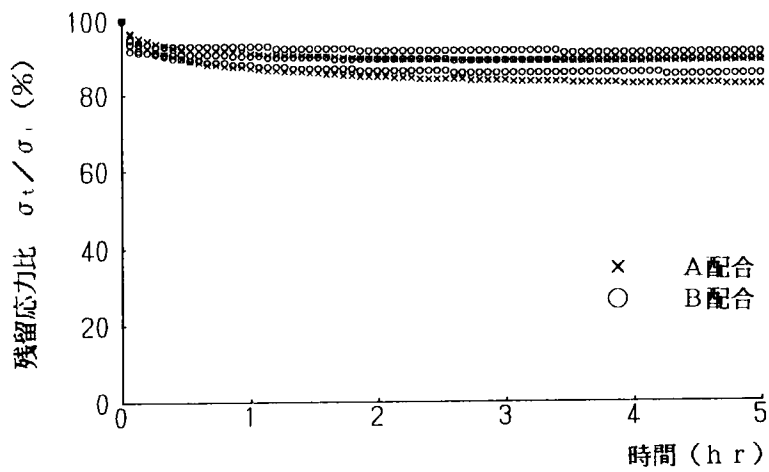


図4-25 引張りラクセーションに及ぼす配合の影響(載荷材令21日)

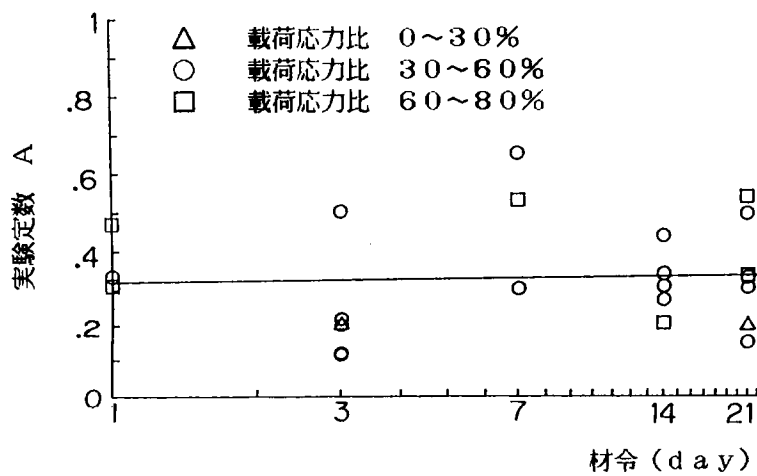


図4-26 材令と実験定数Aの関係

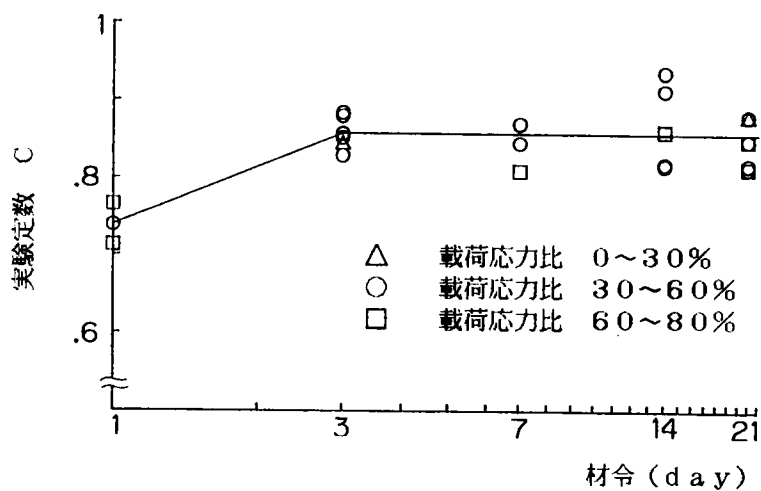


図4-27 材令と実験定数 C の関係

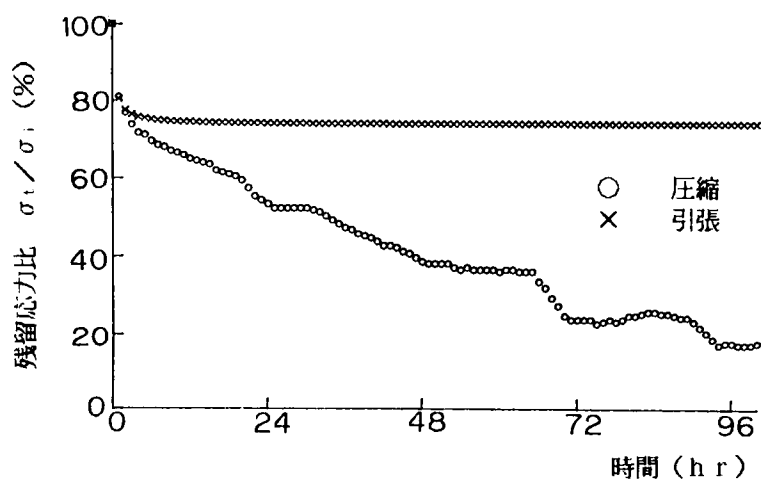


図4-28 圧縮リラクセーションと引張リラクセーション (材令1日)

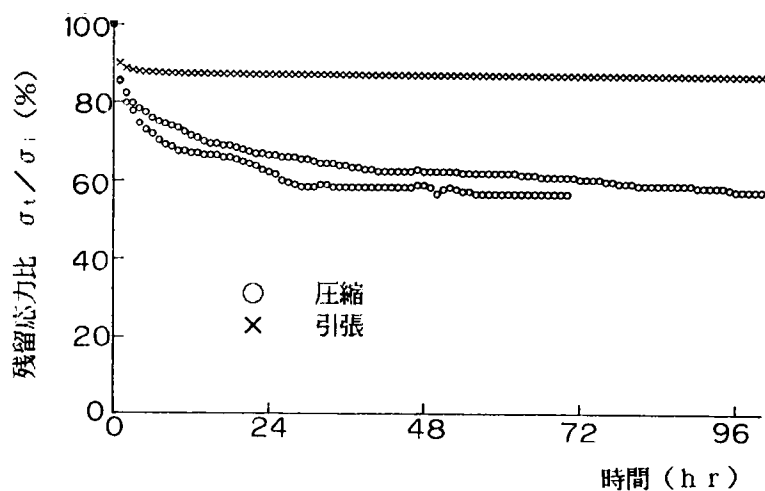


図4-29 圧縮リラクセーションと引張リラクセーション (材令7日)

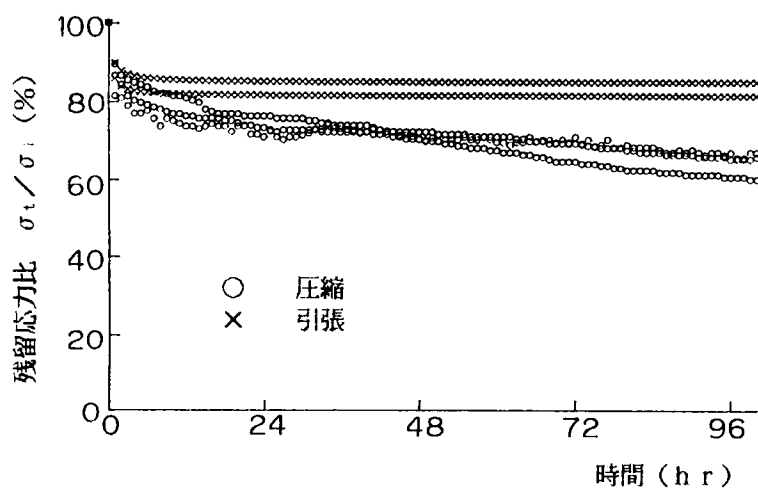


図4-30 圧縮リラクセーションと引張リラクセーション (材令21日)

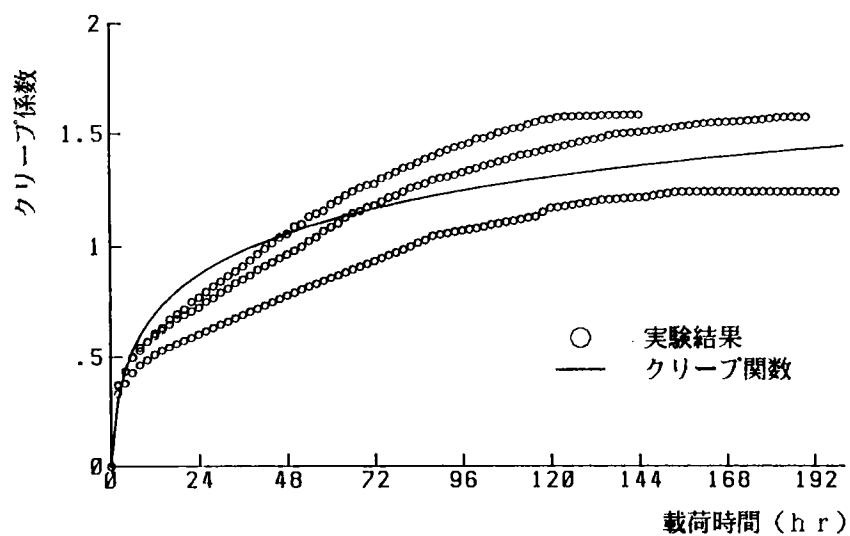


図4-31 クリープ試験結果（載荷材令1日）

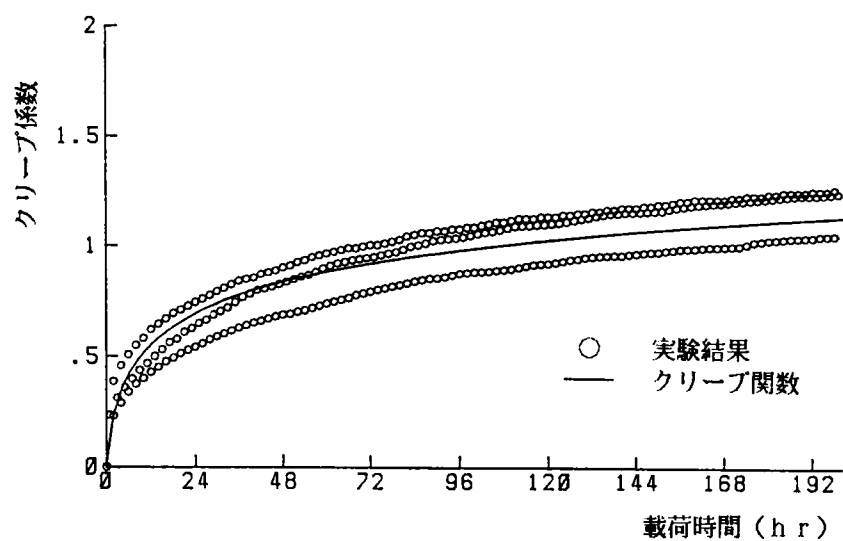


図4-32 クリープ試験結果（載荷材令3日）

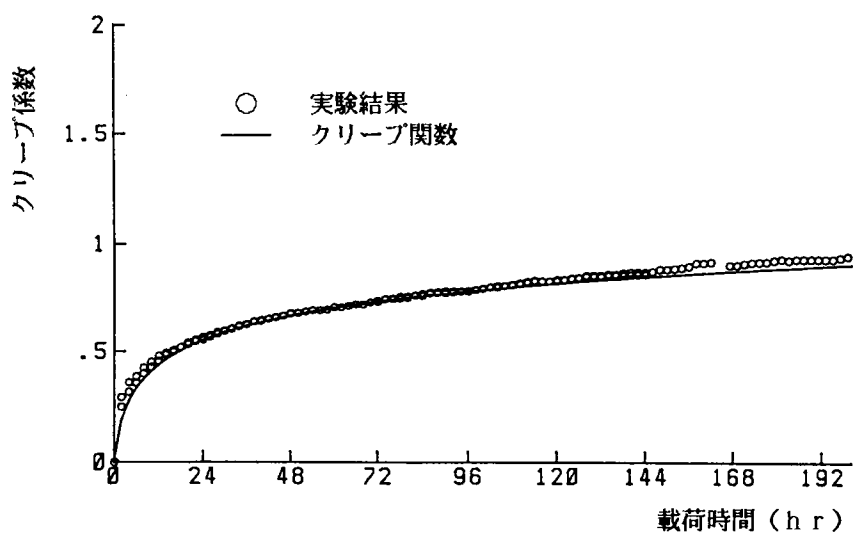


図4-33 クリープ試験結果（荷重材令7日）

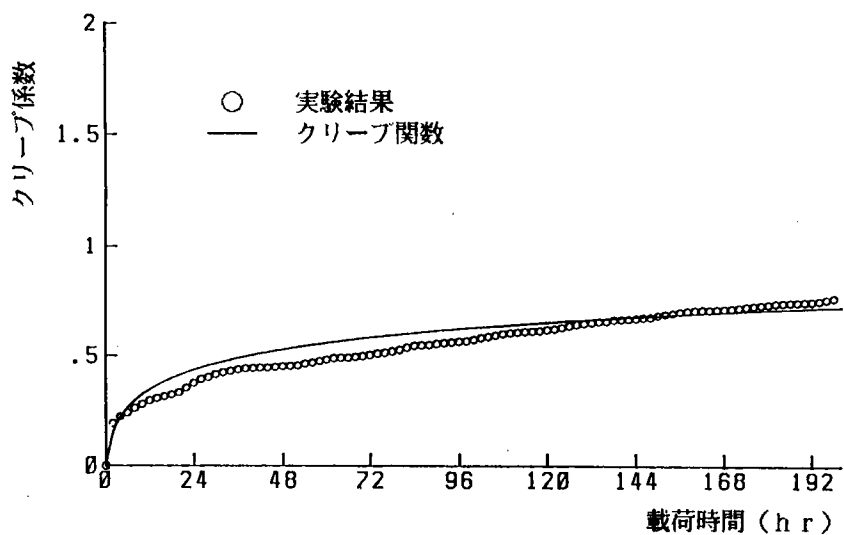


図4-34 クリープ試験結果（荷重材令14日）

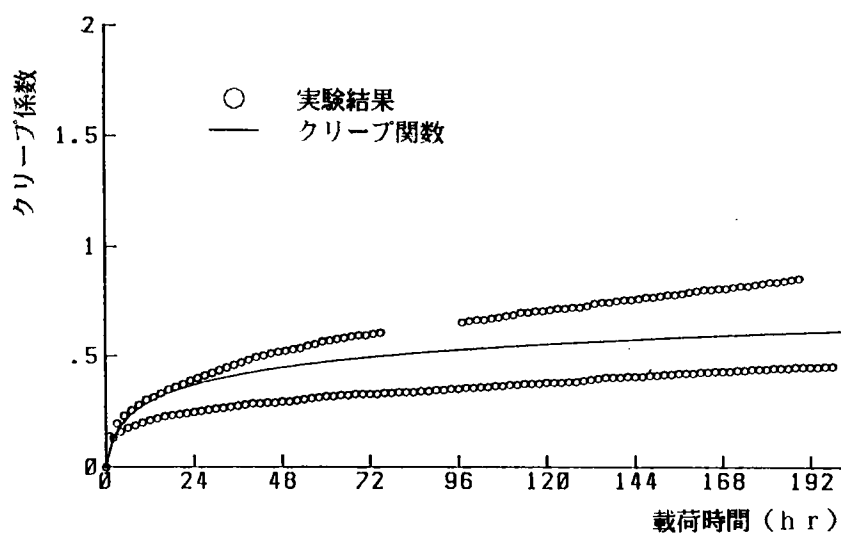


図4-35 クリープ試験結果（荷重材令21日）

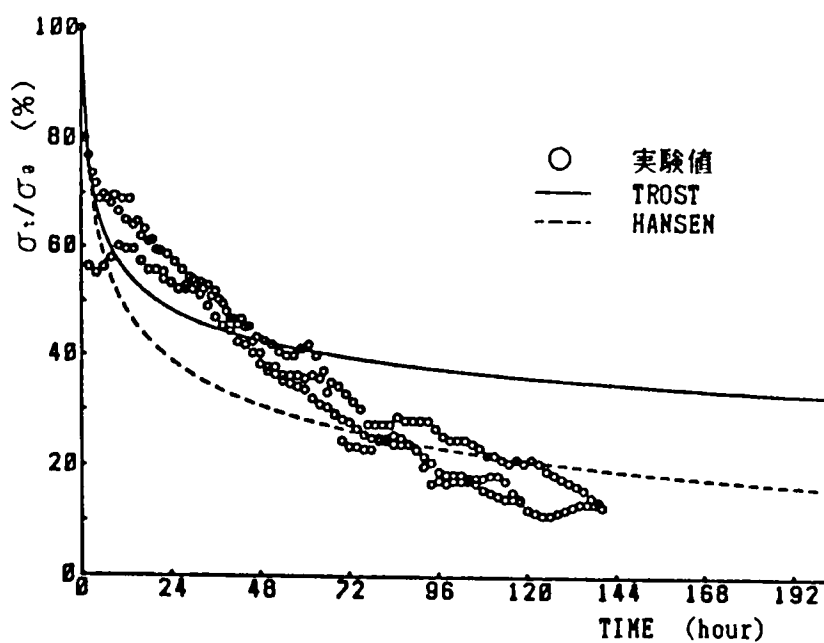


図4-36 リラクセーション曲線（材令1日）

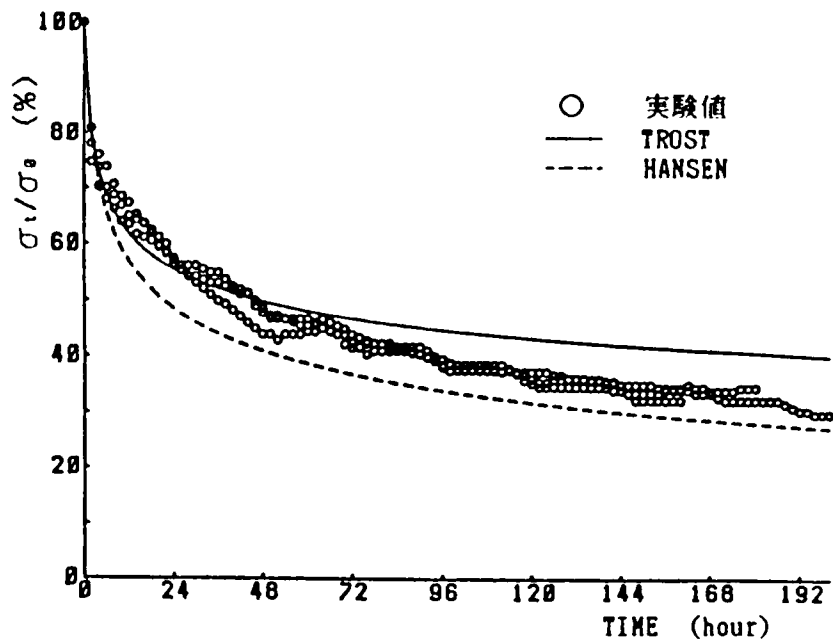


図4-37 リラクゼーション曲線（材令3日）

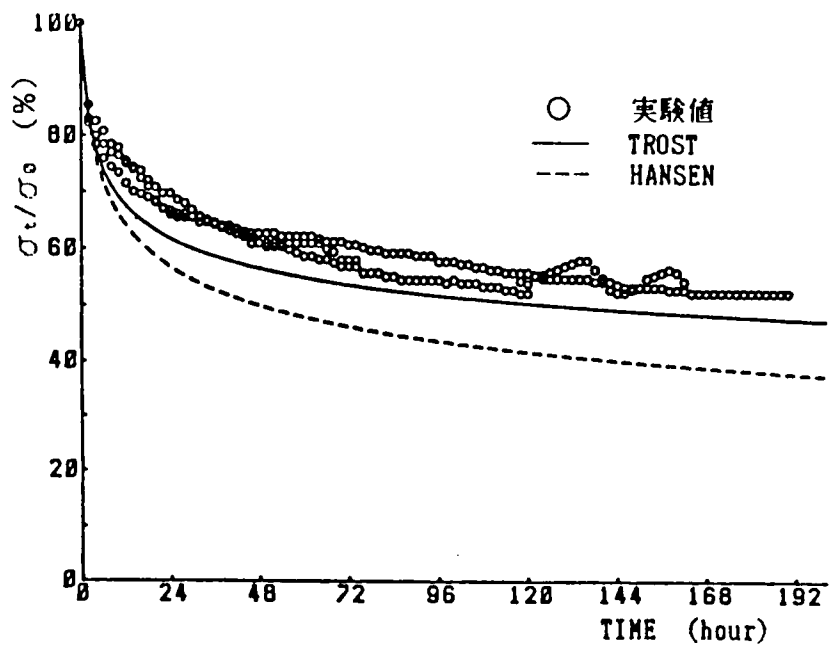


図4-38 リラクゼーション曲線（材令7日）

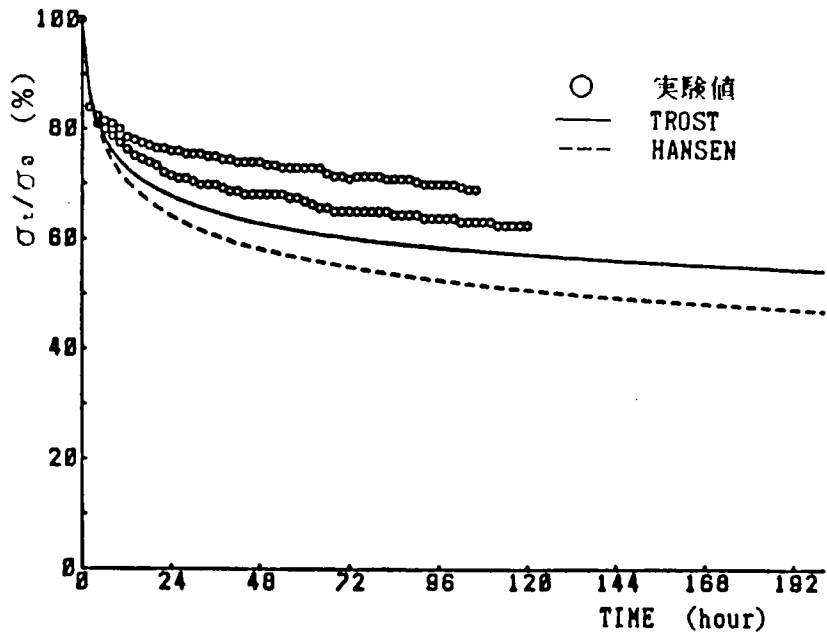


図4-39 リラクゼーション曲線 (材令14日)

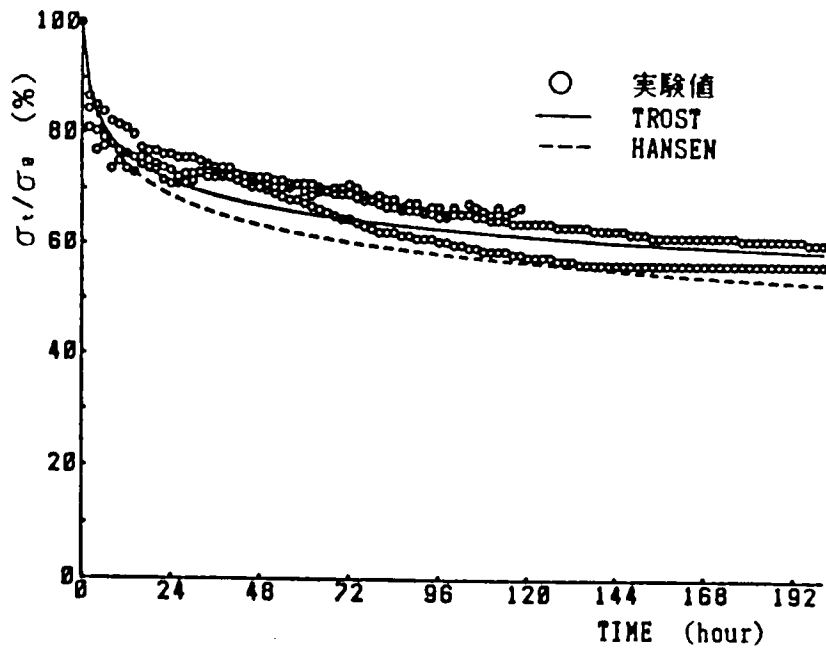


図4-40 リラクゼーション曲線 (材令15日)

5. 1 概説

応力緩和を考慮した温度応力解析は、基本的には材料非線形の応力解析問題であり、その理論的な取り扱いとはほぼ確立されたものとなっている⁽¹⁾。材料非線形問題では、いかに材料構成則を合理的に表現するかが、精度の良い解析結果を得るための要件の一つとなっている。コンクリートの粘弾性構成則を多軸変動応力または、ひずみ場において記述する場合、一般的には状態方程式法、履歴理論、および粘弾性モデルなどが用いられるが⁽²⁾、コンクリートのクリープの履歴依存性から、従来より履歴理論が多く用いられてきた⁽³⁾。その際、クリープ関数を用いると応力履歴でひずみを規定する形式となり、一方、リラクセーション関数を用いるとひずみ履歴で応力を規定する形式となるが、一般的には資料の蓄積の比較的豊富なクリープ関数が多く用いられている。履歴理論により構成式を記述する場合、図5-1(a)，(b)に示すように、通常は各時間ステップにおける応力またはひずみ増分が一定に保たれるものとして、一定応力または、ひずみ条件下で得られたクリープ関数または、リラクセーション関数を用いて、任意時刻のひずみまたは、応力が重ね合せの原理により評価される。しかし、クリープ関数を用いる場合、図5-1(a)の各時間ステップにおける応力増分 $\Delta\sigma_1$ ， $\Delta\sigma_2$ などは、実際にはコンクリートの粘弾性的挙動により減少して行くと考えられ、この点がクリープ関数を用いた場合の一つの難点となっている。ただし、各時間ステップにおいて、その時点までの全ての応力増分に対して応力緩和を考慮した上で、各応力増分によるクリープひずみ増分を評価し、それらを重ね合わせるなどの手法をとれば上で述べた難点を克服することも可能であるが、この場合、計算処理の複雑化ならびに計算量の増加は非常に大きく、実際の解析においてこのような手法を採用するのは容易ではないと考えられる。一方、リラクセーション関数を用いる場合は、各時間ステップにおける弾性ひずみ(拘束ひずみ)の増分が用いられる。温度応力は、基本的には温度ひずみの拘束により生じる応力であり、これがコンクリートのリラクセーションにより減少してゆく。この際、図5-1(b)の各時間ステップで生じた拘束ひずみの増分 $\Delta\varepsilon_{e1}$ ， $\Delta\varepsilon_{e2}$ などは、応力増分にくらべて以後の変化が小さいと考えられ、各時間ステップでのひずみ増分は一定に保たれるという構成式記述上の基本仮定とよく合致する。従って、一般的に履歴理論を用いる場合には、クリープ関数よりむしろリラクセーション関数を用いた方が、精度よく構成式を記述できると考えられる。また、リラクセーション関数は応力緩和現象そのものを簡明に表現しているので、これを用いた構

成式の物理的意味も明快となる。さらに、リラクセーション関数は温度応力の減少を直接的に与えるので温度応力の各種簡易解法において、応力緩和の影響を考慮する際にも便利に用いることができる。本章では、第4章で提案した若材令コンクリートの圧縮ならびに引張りリラクセーション関数により記述した構成式を用いた解析手法（以下、本章ではこれをリラクセーション解析と言う）により、コンクリート壁体2例ならびにコンクリート橋脚1例の、計3例のマスコンクリートの温度応力解析を実施し、各解析結果と各々の構造物に対するコンクリート有効応力計による実測値との対応などを検討することにより、本手法の有用性を明らかにするものである。さらに、本章では、従来から一般的に採用されているクリープ関数による構成式を用いた手法による解析（以下、本章ではこれをクリープ解析と言う）も実施し、リラクセーション解析との関連性についても明らかにしている。

5. 2 温度応力のリラクセーション解析手法ならびにクリープ解析手法

本研究では、3次元有限要素法により各構造物の温度解析、リラクセーション解析ならびにクリープ解析を実施した。以下に、それぞれの手法の概要を述べる。

5. 2. 1 リラクセーション解析手法⁽⁴⁾

等方性材料に対する応力緩和を考慮した構成式は次のように表される。

$$\{\sigma\} = \{\sigma_e\} + \{\sigma_r\} = \{D_e\} \{\varepsilon_e\} + \{\sigma_r\} \quad (5-1)$$

ここで、 $\{\sigma\}$: 応力ベクトル

$\{\sigma_e\}$: 弾性応力ベクトル

$\{\sigma_r\}$: 応力緩和ベクトル

$\{D_e\}$: 弾性マトリックス

$\{\varepsilon_e\}$: 弾性ひずみベクトル

今、応力緩和におけるポアソン比を ν を一定とし、 E_r を

$$E_r \rightarrow \int_0^t R \frac{\partial}{\partial \tau} d\tau \quad (5-2)$$

(ただし、R：応力緩和関数， τ ：材令)

のような演算子とすれば、応力緩和ベクトルと弾性ひずみベクトル $\{\varepsilon_e\}$ の関係は、履歴理論を用いて、次のような弾性構成式と同様の形に表すことが出来る。

$$\begin{aligned}\{\sigma_r\} &= [D_r] \int_0^t R \frac{\partial \{\varepsilon_e\}}{\partial \tau} d\tau \\ &= E_r [D_r] \{\varepsilon_e\}\end{aligned}\quad (5-3)$$

ただし、 $[D_r]$ ：応力緩和マトリックス

ここで、

$$[D_r] = \frac{1}{1-2\nu} \times \begin{pmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \text{Sym.} & & & & \frac{1}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{2} \end{pmatrix}\quad (5-4)$$

非線形解析では、一般に初期ひずみ法、あるいは初期応力法などを用いた増分形式の解析法が採用される⁽¹⁾。本研究では初期応力法によりリラクセーション解析を実施したが、この場合、各時間きざみにおける応力緩和増分を評価する必要がある。今、応力緩和増分を $\Delta\{\sigma_r\}$ 、また時間増分を Δt とすれば式 (5-2) (5-3) より

$$\begin{aligned}\Delta\{\sigma_r\} &= \frac{d}{dt} \{\sigma_r\} \Delta t \\ &= [D_r] \int_0^t \frac{\partial R}{\partial t} \cdot \frac{\partial \{\varepsilon_e\}}{\partial \tau} d\tau\end{aligned}\quad (5-5)$$

が得られる。

5. 2. 2 作用応力の正負によるリラクセーション特性の相違を考慮した解析手法⁽⁵⁾

作用応力の正負によるリラクセーション特性の違いを考慮する場合も、式(5-5)のような増分形式の応力緩和構成式を導かなければならない。本研究では、この場合の解析手法として主ひずみ軸を主方向とする異方性材料として解析を行った。

今、 x, y, z 軸を主方向とし x, z 面内等方性、 y 方向異方性の場合を考える。 x, z 面内における積分演算子を E_1 、 y 方向の積分演算子を E_2 とすると、

$$E_1 \rightarrow \int_0^t R_1 \frac{\partial}{\partial \tau} d\tau \quad (5-6)$$

$$E_2 \rightarrow \int_0^t R_2 \frac{\partial}{\partial \tau} d\tau \quad (5-7)$$

となり、それぞれにおけるリラクセーション関数 R_1, R_2 は異なったもの、すなわち、引張りリラクセーション関数と圧縮リラクセーション関数に対応することになる。ここで、 m を $\{\varepsilon_e'\}$ に対する演算子 E_1 および E_2 の値の比とすれば

$$\frac{E_1 \{\varepsilon_e'\}}{E_2 \{\varepsilon_e'\}} = m \quad (5-8)$$

ただし、 $\{\varepsilon_e'\}$: 主軸座標系でのひずみベクトル

また、ポアソン比 ν については簡略的に異方性を示さないものと仮定して、異方性材料に対する応力緩和マトリックスを $[D_r']$ とすれば、応力緩和構成式は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \{\sigma_r'\} &= E_1 [D_r'] \{\varepsilon_e'\} \\ &= [D_r'] \int_0^t R_1 \frac{\partial \{\varepsilon_e'\}}{\partial \tau} d\tau \end{aligned} \quad (5-9)$$

ただし、

$$[D_r'] = \frac{1}{(1+\nu) [m(1-\nu) - 2m^2\nu^2]} \times \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ & & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \\ & & & d_{44} & d_{45} & d_{46} \\ \text{Sym.} & & & & d_{55} & d_{56} \\ & & & & & d_{66} \end{pmatrix} \quad (5-10)$$

ここに、 $d_{11} = d_{33} = m - m^2\nu^2$

$$d_{12} = d_{23} = m\nu(1+\nu)$$

$$d_{13} = m\nu(1+m\nu)$$

$$d_{22} = 1 - \nu^2$$

$$d_{44} = d_{55}$$

$$= \frac{m(1+\nu) [(1-\nu) - 2m\nu^2]}{2m(1+\nu)}$$

$$d_{66} = \frac{m(1-\nu) - 2m^2\nu^2}{2}$$

$$d_{14} = d_{15} = d_{16} = d_{24} = d_{25} = d_{26} = d_{34}$$

$$= d_{35} = d_{36} = d_{45} = d_{46} = d_{56} = 0$$

また、 $\{\sigma_r'\}$ は主軸座標系での応力ベクトルである。

今、主ひずみ軸の方向余弦マトリックスを $[T]$ とすれば、全体座標系に対する応力緩和構成式は次式のように表される。

$$\{\sigma_r\} = E_r [D_r] \{\varepsilon_e\}$$

$$= [T] [D_r'] [T]^T \int_0^t R_1 \frac{\partial \{\varepsilon_e\}}{\partial \tau} d\tau \quad (5-11)$$

あるいは、

$$\Delta \{\sigma_r\} = [T] [D_r'] [T]^T \int_0^t \frac{\partial R_1}{\partial t} \cdot \frac{\partial \{\varepsilon_e\}}{\partial \tau} d\tau \quad (5-12)$$

ただし、 $[T]^T$: $[T]$ の転置行列

5. 2. 3 クリープ解析手法

クリープ解析では初期ひずみ法を用いた。この場合のクリープ構成式は、リラクセーション解析と同様、履歴理論によるものを用いた。履歴理論によれば、各時間刻みにおけるクリープひずみの増分は、リラクセーション解析の場合と同様にして、つぎのように表される。

$$\Delta \{\varepsilon_e\} = [D_e] \int_0^t \frac{\partial C}{\partial t} \cdot \frac{\partial \{\sigma\}}{\partial \tau} d\tau \quad (5-13)$$

$$[D_e] = \begin{bmatrix} 1 & -\nu_e & -\nu_e & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & -\nu_e & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(1+\nu_e) & 0 & 0 \\ \text{Sym.} & & & & 2(1+\nu_e) & 0 \\ & & & & & 2(1+\nu_e) \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

ここで、 C : クリープ関数
 $\{\varepsilon_e\}$: クリープひずみベクトル
 $\{\sigma\}$: 応力ベクトル
 $[D_e]$: クリープマトリックス
 ν_e : クリープポアソン比

5. 3 解析対象構造物

解析を行った構造物は、橋脚1体⁽⁶⁾と壁2体⁽⁷⁾⁽⁸⁾（以下、それぞれを壁（A）、壁（B）と

呼ぶことにする）の計３体のマスコンクリート構造物で、特に注目した部分はいずれの場合も新規打設部分（新コンクリート）である。図５－２～５－４に各構造物の形状ならびに各種測定計器の主要な埋設位置を示す。表５－１に橋脚ならびに壁（Ａ），（Ｂ）のコンクリート示方配合を、また表５－２に各コンクリートの材令２８日での強度ならびに弾性係数を示す。

５．４ 解析方法

５．４．１ リラクセーション関数

リラクセーション解析で用いた圧縮ならびに引張りリラクセーション関数は、第４章で提案した双曲線型の実験式である。すなわち、

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + C t}{A + t} \quad (5-15)$$

ここで、 t ：載荷時の時間

σ_t ：時間 t での応力

σ_i ：初期載荷応力

A, C ：実験定数

定数 A, C の算定にあたっては、第４章４．２および４．３で述べた実験により求めた次の評価式を用いた。

（イ）圧縮リラクセーション特性

$$\begin{aligned} A &= -8.25 \ln t + 49.74 & (t < 168\text{hr}) \\ &= 7.43 & (t \geq 168\text{hr}) \quad (5-16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C &= 0.25 \ln t - 0.75 & (t < 168\text{hr}) \\ &= 0.07 \ln t + 0.18 & (t \geq 168\text{hr}) \quad (5-17) \end{aligned}$$

(ロ) 引張りラクセーション特性

$$A = 0.32 \quad (5-18)$$

$$\begin{aligned} C &= 0.10 \ln t + 0.39 & (t < 72\text{hr}) \\ &= 0.85 & (t \geq 72\text{hr}) \quad (5-19) \end{aligned}$$

5. 4. 2 クリープ関数

クリープ解析で用いたクリープ関数についても第4章4. 5で提案したものを用いた。
すなわち、

$$\varepsilon_t = \varepsilon_i \varphi_t = \frac{\sigma_i}{E_i} \varphi_t \quad (5-20a)$$

$$\varphi_t = K \ln(t+1) \quad (5-20b)$$

ここで、
 ε_t : 載荷後の時間 t でのクリープひずみ
 E_i : 載荷時の弾性係数
 σ_i : 載荷応力
 φ_t : 時間 t でのクリープ係数
 K : 実験定数

定数 K の算定にあたっては、第4章4. 5. 2で述べたクリープ実験から得られた各載荷材令に対する K の値に最小二乗法を適用して求めた次式を用いた。

$$K = -0.0515 \ln t + 0.435 \quad (5-21)$$

5. 4. 3 解析諸定数

(a) 弾性係数およびポアソン比

橋脚ならびに壁(B)の解析で用いた弾性係数評価式は、第3章3. 2. 2で述べたように岡

田らの提案式⁽⁹⁾を基本としたものを用いた。すなわち、

$$E(\tau)/E_{(28)} = 1.55 \log_{10} \tau + 0.48 \quad (0.7 \leq \tau \leq 1.4) \quad (5-22)$$

$$E(\tau)/E_{(28)} = 0.21 \log_{10} \tau + 0.68 \quad (1.4 < \tau \leq 41) \quad (5-23)$$

ここで、 τ : 有効材令 (日)

$E_{(28)}$: 材令 28 日での弾性係数 (kgf/cm²)

一方、壁 (A) の解析では、打設コンクリートより求められた次のような実験式を用いた。

$$E(\tau) = 0.351 \times \frac{\tau}{2.15 + \tau} \times 10^6 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (5-24)$$

ポアソン比については、弾性ポアソン比、応力緩和ポアソン比、ならびにクリープポアソン比などは全て同一の値 0.16 と仮定した。

(b) 熱的性質

各構造物の温度解析で用いたコンクリートの熱的性質は、第 3 章 3. 2. 1 で詳述した方法により決定した。これらをまとめて表 5-3 に示す。

5. 4. 4 解析ケース

本研究の主たる目的は、前述のように温度応力のリラクセーション解析の有用性を検討することにある。従って、リラクセーション解析については、圧縮リラクセーション特性のみを用いた解析に加えて、圧縮リラクセーション特性と引張りリラクセーション特性の相違を考慮した解析手法についても検討を行っている。一方、比較のために実施したクリープ解析については、圧縮クリープ特性のみを用いた場合だけを実施した。全解析ケースをまとめて表 5-4 に示す。

5. 5 解析結果および考察

5. 5. 1 温度解析結果

(a) 壁 (A)

図5-5に、壁(A)の中央中心と表面の温度実測値と解析値を示す。図から、中心の最高温度は、実測で材令2.5日において52.4℃(打ち込み温度からの温度上昇36.4℃)に達している。実測値と解析値との対応は中心、表面とも全般的に良好であり、両者の差は5℃以下に収まっている。

(b) 壁 (B)

図5-6に、壁(B)の中央中心と表面の温度実測値と解析値を示す。図から、中心の最高温度は、実測で材令1~1.5日にかけて50.0℃(打ち込み温度からの温度上昇25.0℃)を記録している。実測値と解析値は、中心、表面とも5℃以内の差に収まっている。

(c) 橋脚

図5-7に、橋脚中央中心と表面の温度実測値と解析値を示す。図から、実測による中心の最高温度は材令4~4.5日で54.2℃(打ち込み温度からの温度上昇41.2℃)を示している。実測値と解析値との対応は壁同様中心、表面とも全般的に良好であり、両者の差は5℃以内となっている。

5.5.2 圧縮特性のみを使用したクリープ解析とリラクセーション解析

(a) 壁 (A)

図5-8~5-10に、壁中央と底部の中心および頂部表面における温度応力の実測値ならびに解析値を示す。各図から、壁(A)に発生する温度応力は、いずれの部分においても温度上昇期に圧縮応力が発生し、温度がピークとなる時期に圧縮応力が最大値を示す。そして、それ以降は温度降下に伴い引張応力が次第に増加していく傾向を示している。実測値で壁底部、中央、および頂部の応力をそれぞれ比較すると、中央に最も大きな応力が発生していることがわかる。頂部では気温の変化に伴い応力が周期的に大きく変動している。なお、材令6~7日以降実測値が不連続となっているのは、ひびわれ発生の影響とも考えられる。図5-8で、中央中心のリラクセーション解析値と実測値に注目すると、全般的に両者はよく合致しており、最大圧縮応力については実測値の14.7kgf/cm²に対して解析値は18.7kgf/cm²、また材令6日での引張応力は、実

測値の 6.0kgf/cm^2 に対して解析値は 5.7kgf/cm^2 を与えている。一方、クリープ解析値に注目すると、定性的には実測値、あるいはリラクセーション解析値とよく合致しているが、全般的にリラクセーション解析値に比べ応力の緩和量を大きく評価しており、特に若材令においてその傾向が顕著である。例えば、最大圧縮応力のクリープ解析値は 8.5kgf/cm^2 で、リラクセーション解析値の45%程度の値となっている。また、材令6日での引張応力は 11.0kgf/cm^2 で、実測値あるいはリラクセーション解析の2倍程度の値を与えている。圧縮応力減少期から引張応力発生期にかけては、リラクセーション解析とクリープ解析における引張応力増分の差が小さくなり、その結果、材令後期の引張応力についての両解析値の差異は小さくなる傾向を示している。例えば、材令14日のリラクセーション解析値 54.3kgf/cm^2 に対し、クリープ解析は 50.5kgf/cm^2 とリラクセーション解析値の93%程度の値を与えている。図5-9から、底部においてもリラクセーション解析値と実測値は材令7日までは非常に良好な対応を示している。圧縮応力の最大値は、実測値の 10.5kgf/cm^2 に対し、リラクセーション解析値は 10.3kgf/cm^2 を与えている。また、材令7日の引張応力は、実測値の 2.2kgf/cm^2 に対して解析値は 6.9kgf/cm^2 を与えている。一方、クリープ解析値は中央中心と同様、リラクセーション解析値に比べ応力緩和量をかなり大きく評価する傾向にあり、最大圧縮応力のクリープ解析値は 4.5kgf/cm^2 となっている。また、材令7日の引張応力についてのクリープ解析値は 9.6kgf/cm^2 で、実測値さらにはリラクセーション解析値より大きな値を与えている。図5-10から、頂部表面では実測値において気温変化に伴う周期的な変動が見られるが、平均的に見ると材令6日までは実測値とリラクセーション解析値は良好に対応している。一方、クリープ解析値は実測値と大きな差異はないが、リラクセーション解析値に比べやはり応力緩和量を大きく評価している。

以上のような壁(A)各部についての検討から、材令初期における温度応力の実測値とリラクセーション解析値とは良好に一致すること、また、材令6～7日の引張応力についても、クリープ解析値にくらべ実測値とよく合致することが明らかとなった。一方、クリープ解析値については実測値と著しい差異は生じなかったが、リラクセーション解析値にくらべ応力緩和量を大きく評価する傾向にあり、その結果、リラクセーション解析値にくらべ、材令初期の圧縮応力の最大値は45%程度、材令後期の最大引張応力は93%程度の値となることが明らかとなった。

(b) 壁(B)

図5-11、に壁(B)中央中心における温度応力実測値と解析値を示す。図から、壁(B)に発生する温度応力は壁(A)同様、外部拘束が卓越する場合の傾向を示すが、壁(A)に比べて壁厚が80cmと、壁(A)の約半分であることから、最大圧縮応力の発生時期ならびに引張応力への反転時期がかなり早くなっている。最大圧縮応力は、実測値で材令1.5日において 6.0kgf

／ cm^2 を記録している。また、引張応力は材令6日付近で9～10 kgf/cm^2 に達し、それ以降は応力緩和の傾向は認められず、ほぼ一定の値を保っている。リラクセーション解析値と実測値とを比較すると、材令3日までの材令初期においては、両者はよく合致しており最大圧縮応力の実測値6.0 kgf/cm^2 に対して、リラクセーション解析値は4.2 kgf/cm^2 を与えている。しかし、材令3日以降の引張応力発生期に移ると、解析値の引張応力増分が実測値の約2倍程度の大きさとなり引張応力がほぼ一定となる材令7日においては、実測値の9～10 kgf/cm^2 に対して、リラクセーション解析値は19～20 kgf/cm^2 の値を与えている。つぎに、クリープ解析値に注目すると、クリープ解析では壁（A）同様、特に若材令においての応力緩和を大きく評価する結果となり、最大圧縮応力のクリープ解析値はリラクセーション解析値の1/4程度の1.1 kgf/cm^2 を与えており、実測値と比べてもかなり小さい。材令6日以降においては、両手法における引張応力増分値の差が小さくなるため両解析値の差は小さくなり、最大引張応力についてのクリープ解析値は13～14 kgf/cm^2 と、リラクセーション解析値の70%程度の値となっている。この最大引張応力については、リラクセーション解析値よりは実測値に近い値を与えている。

以上のような壁（B）についての検討から、材令初期の圧縮応力発生時期においては、実測値とリラクセーション解析値とは良好に合致するが、応力反転後の引張応力については、リラクセーション解析値が実測値の最大2倍程度大きな値を示す。一方、クリープ解析では、壁（A）同様、特に材令初期に応力緩和を大きく評価し、たとえば最大圧縮応力ではリラクセーション解析値の25%、また実測値の18%程度の値となった。しかし、材令が進行するとリラクセーション解析値との差異が小さくなる傾向にあることが明らかとなった。

（c）橋脚

図5-12～5-14に、橋脚中央中心と表面の水平方向応力、ならびに中央表面の鉛直方向応力の実測値と解析値を示す。各図から、橋脚に発生する温度応力は、表面では温度上昇期に引張応力がピークとなり、それ以降、温度の降下に伴い圧縮応力へと移行してゆく。一方、中心では表面とほぼ逆の傾向、すなわち圧縮応力から次第に引張応力へと移行していく傾向を示す。図5-12から、実測によると中央表面では、材令6～7日で引張応力が13.4 kgf/cm^2 の最大値を示す。そして、材令10日付近で圧縮応力へと反転し、材令15日以降は5 kgf/cm^2 前後の値で大きく変化しないことがわかる。つぎに解析値に注目すると、リラクセーション解析値と実測値との対応は全般的に良好であり、例えば最大引張応力については、実測値の13.4 kgf/cm^2 に対して、11.8 kgf/cm^2 を与えている。一方、クリープ解析は前述の壁同様、リラクセーション解析に比べ材令初期において応力緩和量を著しく大きく評価しており、例えば最大引張応力は4.3 kgf/cm^2 を与えている。これはリラクセーション解析値の36%程度、また実測値と比較してもかなり小さな

値となる。材令後期においては、両手法の圧縮応力増分量の差が小さくなるため、両者の差異が小さくなっている。図5-13から、実測によると中央中心では材令7日付近で圧縮応力が 21.4 kgf/cm^2 の最大値を示し、その後、材令14日付近で引張応力に転じ、材令22日付近で約 30 kgf/cm^2 に達する。これに対して、リラクセーション解析値では最大圧縮応力が 15.1 kgf/cm^2 となっており、この時期までは実測値と比較的良好に合致している。しかし、圧縮応力ピーク期以降は、実測値に比べ引張応力増分が約1/2程度とかなり小さく、材令22日での引張応力解析値は 6.5 kgf/cm^2 となっている。一方、クリープ解析では最大圧縮応力が 6.9 kgf/cm^2 となっており、表面同様材令初期での応力緩和量を大きく評価している。圧縮応力ピーク期以降の引張応力については、表面同様、リラクセーション解析との差異が小さくなっている。図5-14から、中央表面の鉛直方向応力は、実測値、解析値とも図5-12に示した同位置における水平方向応力とほぼ同様の傾向を示し、最大引張応力は、実測値で 11.6 kgf/cm^2 となっている。ただ、材令後期の圧縮応力については、水平方向のほぼ2倍程度の値を示している。リラクセーション解析値と実測値との対応は全般的に良好であり、また、クリープ解析は、特に材令初期においてかなり小さな応力を与えるが、材令後期ではリラクセーション解析との差が小さくなっている。

以上のような橋脚についての検討から、材令初期の温度応力の実測値とリラクセーション解析値とは良好に合致することが明らかとなった。しかし、材令後期になると両者の差異が大きくなる傾向が見られた。一方、クリープ解析値については、壁の場合と同様、特に材令初期に応力緩和を大きく評価する傾向にあり、その結果、実測値およびリラクセーション解析値との対応が悪くなることなどが明らかとなった。

(d) リラクセーション解析とクリープ解析の適用性

3例のマスコンクリートについて、温度応力のリラクセーション解析値を実測値およびクリープ解析値と比較した。その結果、いずれの構造物においても全般的にリラクセーション解析は実測値とよく合致する結果を与えた。一方、クリープ解析値は応力緩和を大きく評価し、特に材令初期においてリラクセーション解析値あるいは実測値にくらべかなり小さな値を与える傾向にあった。これは、リラクセーション解析で用いた構成式とクリープ解析で用いた構成式が互いに等価でないことに起因すると考えられる。

このような結果を踏まえて、本章で提案するリラクセーション解析手法の適用性を検討するにあたり、実測値との対応が1つの着眼点となる。すなわち、有効応力計による温度応力の実測は、その精度についていくつかの論議があり⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、まだ十分に信頼されるまでには至っていないのが実状であるが、少なくとも構造物中の温度応力の有効な目安には成り得るものと考えられる。さて、リラクセーション解析値は、上述のように、実測値との対応も全般的に良好であり、従っ

て、本手法は応力緩和を考慮した温度応力の解析を行う際の有用な手法に成り得るものと考えられる。一方、クリープ解析手法については、実測値との対応では特に材令初期リラクセーション解析にくらべ劣る結果となった。中、長期材令では、実測値あるいはリラクセーション解析との差異は小さくなる傾向は認められたが、全般的に見た場合は、本研究の範囲内ではリラクセーション解析にくらべ精度的にやや劣ると判断された。

以上のように、本章で提案するリラクセーション解析手法は、精度面あるいは実用面においてクリープ解析手法にくらべ同程度以上であることが明らかとなった。しかも、理論面では前述のように、リラクセーション解析手法では「温度応力の緩和現象の解析」という解析目的に即した形で簡明に構成式を記述できる利点を有している。

5. 5. 3 圧縮ならびに引張リラクセーション特性を用いたリラクセーション解析

前節のリラクセーション解析では、応力の正負にかかわらず圧縮リラクセーション関数を用いた。さて、第4章4. 3で明らかにしたように、圧縮リラクセーション特性と引張リラクセーション特性は、多くの点でその性質を異にする。したがって、リラクセーション解析を行う際、圧縮応力のリラクセーションを評価する場合は圧縮リラクセーション関数、そして引張応力に対しては引張リラクセーション関数を用いるのが合理的である。しかしながら、一方では解析過程の複雑化を伴うため、その工学的意義を十分把握しておくことが重要となる。

本節では、圧縮と引張のリラクセーション特性を用いた解析手法をA法とし、一方、前節で示した圧縮リラクセーション特性のみを用いる解析手法をB法と名付けて両手法の比較、検討を行う。

(a) 壁 (A)

図5-15, 5-16に、壁(A)の中央中心と底部中心の温度応力についてのA法、B法の解析結果ならびに実測値を示す。図5-14から、中央中心で、材令初期の圧縮応力発生期においては、A法、B法ともほぼ同様の値を示し、実測値との対応も良好である。しかし、温度下降期に移ると、A法における引張応力増分がB法に比べて大きく、材令が進行するに伴い、A法の方が大きな引張応力解析値を与えている。たとえば、材令14日での引張応力について、A法は 72.7kgf/cm^2 、B法は 54.3kgf/cm^2 で、A法はB法にくらべて34%程度大きな値を与えている。この引張応力発生期においては、A法の方がより実測値に近い値を与えている。図5-16から、底部中心においても中央中心同様、圧縮応力発生期においてはA法、B法ともほとんど差異はないが、引張応力発生期ではA法の方が引張応力を大きく与える傾向にある。実測値との対応はA

法、B法とも差異は認められない。

(b) 壁 (B)

図5-17に、壁(B)の中央中心における応力実測値ならびにA法、B法の各解析値を示す。図から、壁(B)においても、壁(A)同様、材令初期の圧縮応力発生期まではA法、B法ともほぼ同じ解析値を与えるが、引張応力発生期に移るとA法の方が大きな引張応力解析値を与えている。たとえば最大引張応力ではA法の方が43%大きな値となっている。実測値と解析値との対応については、A法が実測値に比べB法よりさらに大きな値を与えている。

(c) 橋脚

図5-18, 5-19に、橋脚中央の表面と中心の応力実測値とA, B両法による解析値を示す。図5-18から、中央表面では、A法における材令初期での引張応力増分がB法に比べて大きく、最大引張応力ではA法 17.2kgf/cm^2 、B法 11.8kgf/cm^2 で、A法の方が45%程度大きな値を与えている。引張応力減少期から圧縮応力発生期にかけては、この間での圧縮応力増分がA法、B法とも大差なく、両解析値の差はほぼ一定値を保っている。実測値との対応では、A法、B法とも全般的に大差はない。図5-19から、中央中心では、材令初期の圧縮応力増加期において、A法による圧縮応力増分がB法よりも若干大きくなるが、最大圧縮応力をみると中央表面の最大引張応力における程の差異は生じていない。そして、圧縮応力減少期以降もA法の引張応力増分はB法のそれよりも若干大きい程度である。実測値との対応ではA法とB法は同程度である。

以上のように、リラクセーション解析において応力の正負によるリラクセーション特性の相違を考慮するA法は、圧縮リラクセーション特性のみを用いたB法に比べて全般的に応力の緩和量を小さく評価し、特に引張応力が増加するような期間においてこの傾向が顕著となることが明らかとなった。例えば、本研究で解析を行った例では、最大引張応力についてA法がB法に比べて34~45%程度大きな値を与えた。これは、引張りリラクセーションが圧縮リラクセーションにくらべて緩和量が少ないことに起因すると考えられる。実測値との対応では、A法とB法とでは大きな差異は認められず本研究の範囲内では精度上の優劣について判断を下すまでには至らなかった。しかし、A法は温度ひびわれの原因となる引張応力をB法より大きく評価することから、今後さらに検討を進めて行く必要がある。

5.6 まとめ

本研究により、マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析において、リラクセーション関数による構成式を用いることの有効性が示されたと考ええる。本研究で得られた結論をまとめると次のようになる。

(1) リラクセーション解析手法とクリープ解析手法により、壁2例と橋脚1例の計3例を解析した結果、クリープ解析における応力緩和量の評価がリラクセーション解析に比べて大きくなる傾向にあった。特に、材令初期でその傾向が強く、著しい場合はクリープ解析値はリラクセーション解析値の25%程度の値となった。これは、両解析手法で用いた構成式が互いに等価でないことに起因すると考えられる。

(2) 実測値との対応では、リラクセーション解析は、特に材令初期で実測値とよく合致する結果を与えた。しかし、中、長期材令になると実測値との対応が悪くなる傾向がみられた。一方、クリープ解析は、材令初期で応力の緩和を大きく評価する傾向にあり、実測値との対応も悪くなる傾向にあった。

(3) リラクセーション解析手法は、実測値との全般的な対応などから、クリープ解析手法と同等以上の精度および実用性を有するものと判断された。さらに、理論面においても解析目的に即した形で簡明に構成式を記述できる点で有利であると考えられた。

(4) 本研究における解析から、クリープ解析手法は温度応力を小さく評価する可能性もあるので、温度ひびわれの予測などを行う場合、この点に留意する必要がある。

(5) リラクセーション解析において、作用応力の正負によるリラクセーション特性の変化を考慮した場合(A法)は、圧縮特性のみを用いた場合(B法)にくらべ引張応力を大きく評価する。本研究の範囲内ではA法とB法の精度面での優劣について明確な判断を下すまでには至らなかったが、A法は温度ひびわれの原因となる引張応力を大きく評価することから、今後さらに検討を進めて行く必要がある。

(参考文献)

- (1) O. C. Zienkiewicz (吉識雅夫, 山田嘉昭 監訳) : マトリックス有限要素法, 培風館, 1975

- (2) 河田秋澄, 大崎幸雄, 吉川弘道: マスコンクリートの温度応力解析に適用する構成方程式の検討, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C2 日本コンクリート工学協会, pp. 49~55, 1982
- (3) N. Kh. Arutyunyan: Some Problems in the Theory of Creep in Concrete Structures, Pergamon Press, 1966
- (4) 平田正成, 森本博昭, 小柳 治: マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 第2号, pp. 19~24, 1987
- (5) 森本博昭, 小柳 治: マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析に関する研究, 土木学会論文集, 第402号/V-10, pp. 125~134, 1988
- (6) 森本博昭, 飯田正幸, 巢元利博, 小柳 治: コンクリート橋脚柱の温度応力の実測ならびに解析, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 45~50, 1984
- (7) 毛利泰治, 戸田博文, 森本博昭, 小柳 治: 2. 3の方法によるコンクリート壁の温度応力の実測と解析, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 51~54, 1984
- (8) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書: 外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案, 日本コンクリート工学協会, pp. 87~88, 1985
- (9) 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘: マスコンクリートの基本的特性に関する考察, セメント技術年報, Vol. 34, pp. 230~233, 1980
- (10) 田沢栄一, 飯田一彦: 新型応力計について, 第2回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 117~120, 1980
- (11) 竹下治之, 浅沼 潔, 横田季彦, マスコンクリートの中の計器特性について, 第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, JCI-C7, 日本コンクリート工学協会, pp. 87~88, 1984

表5-1 コンクリート示方配合

	スラフ° (cm)	s/a (%)	W/C (%)	単位重量 (kg/m³)			
				W	C	S	G
壁 (A)	15	44	50	173	346	793	966
壁 (B)	8	44.7	55.5	163	294	813	1031
橋 脚	8	42	60	163	272	771	1079

表5-2 コンクリートの力学的性質 (材令28日)

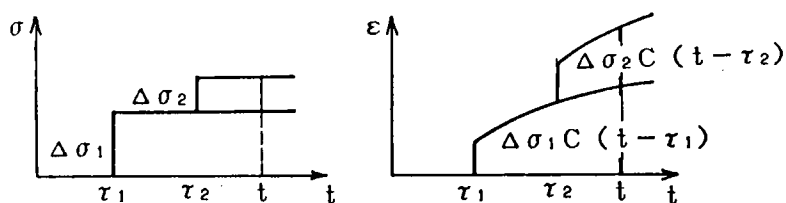
	壁 (A)	壁 (B)	橋 脚
圧縮強度 (kgf/cm²)	321	288	258
引張強度 (kgf/cm²)	—	21.7	21
弾性係数 (kgf/cm²)	3.45×10^5	2.48×10^5	2.53×10^5

表5-3 コンクリートの熱的性質

	壁 (A)	壁 (B)	橋 脚
断熱温度上昇	$T = 55.1(1 - e^{-0.574t})$	$T = 37.8(1 - e^{-0.0731t})$	$T = 37.8(1 - e^{-0.03505t})$
コンクリート 熱伝導率 (kcal/mh°C)	2.35	同左	同左
コンクリート 比熱 (kcal/kg°C)	0.24	同左	同左
熱伝達率 (kcal/m²h°C)	10.0(コンクリート面) 5.0(型枠面)	同左	同左
コンクリート 打設温度(°C)	16	25	13

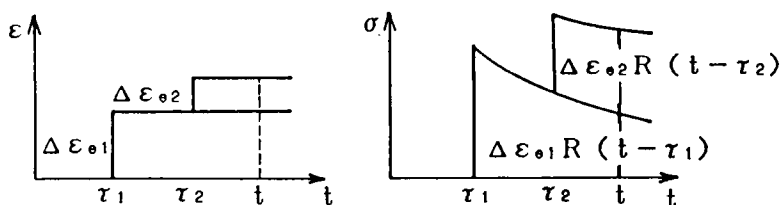
表5-4 解析ケース

		壁 (A)	壁 (B)	橋 脚
リラクセーション解析	圧縮特性のみ使用	RC-A	RC-B	RC-C
	圧縮特性と引張特性を使用	RCT-A	RCT-B	RCT-C
クリープ解析	圧縮特性のみ使用	CC-A	CC-B	CC-C



$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \Delta\sigma_1 C(t-\tau_1) + \Delta\sigma_2 C(t-\tau_2) \\ C(t) : \text{クリープ関数} \end{cases}$$

図5-1(a) 重ね合わせの原理(クリープ関数)



$$\begin{cases} \sigma(t) = \Delta\varepsilon_{01} R(t-\tau_1) + \Delta\varepsilon_{02} R(t-\tau_2) \\ R(t) : \text{リラクセーション関数} \\ \Delta\varepsilon_0 (= \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_t) : \text{弾性ひずみ} \\ \Delta\varepsilon : \text{全ひずみ}, \Delta\varepsilon_t : \text{温度ひずみ} \end{cases}$$

図5-1(b) 重ね合わせの原理(リラクセーション関数)

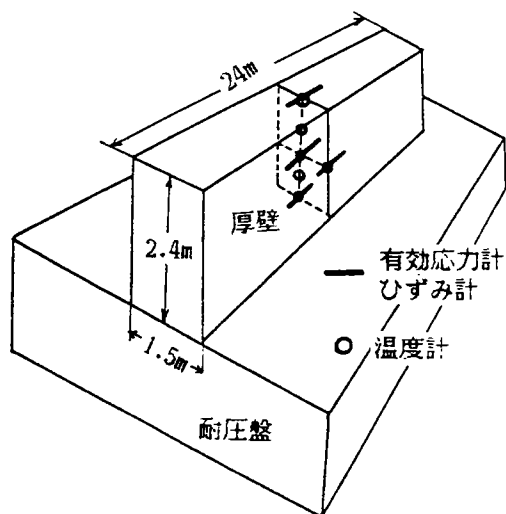


図5-2 壁(A)

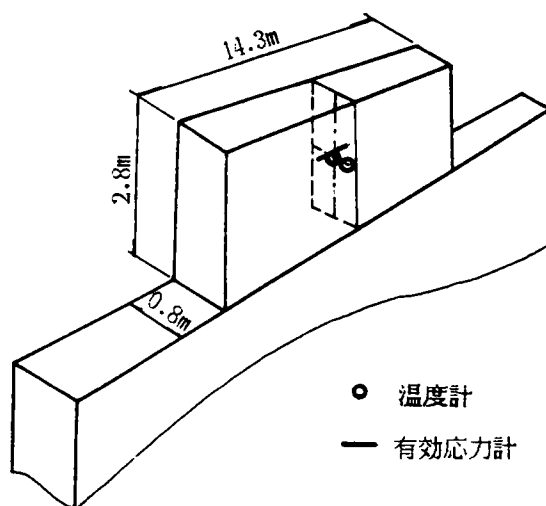


図5-3 壁(B)

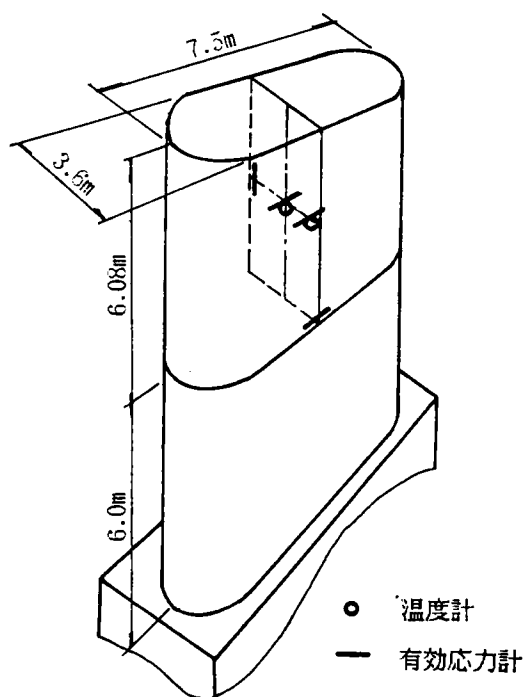


図5-4 橋脚

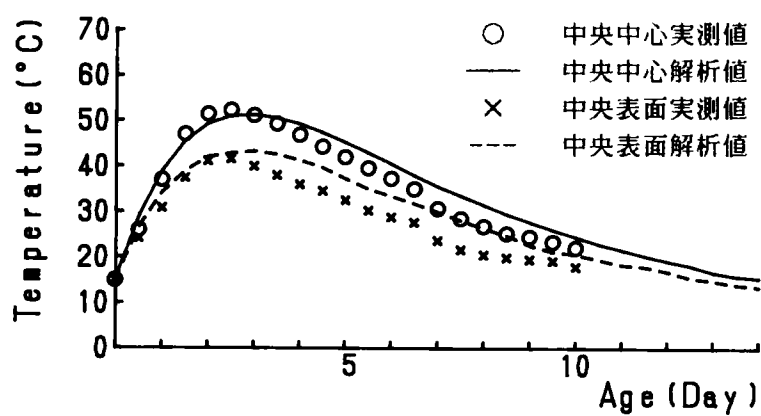


図5-5 壁(A)の温度上昇

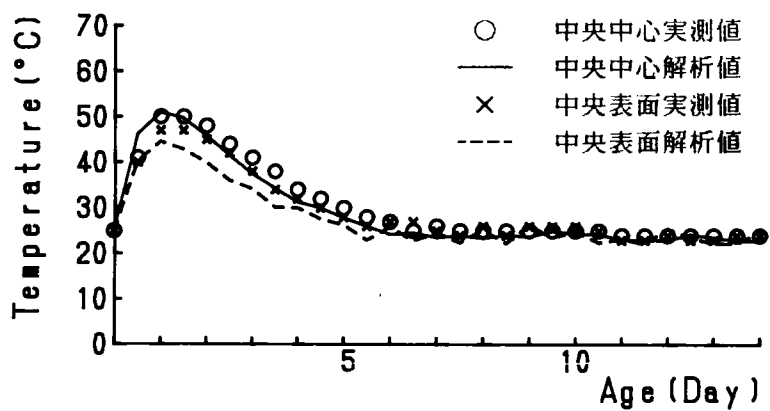


図5-6 壁(B)の温度上昇

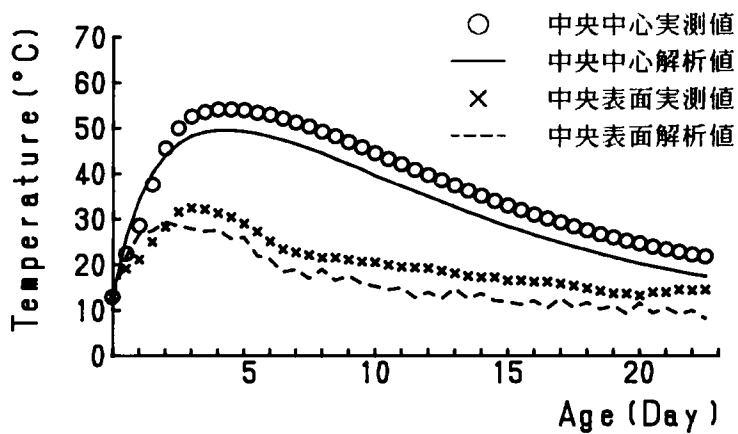


図5-7 橋脚の温度上昇

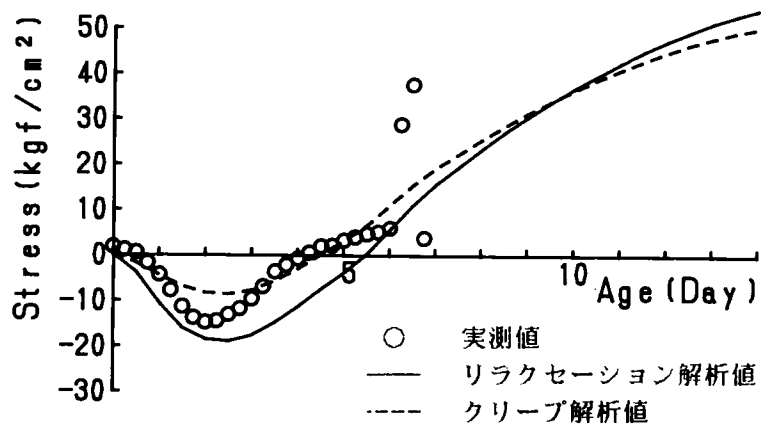


図5-8 壁(A)中央中心の温度応力

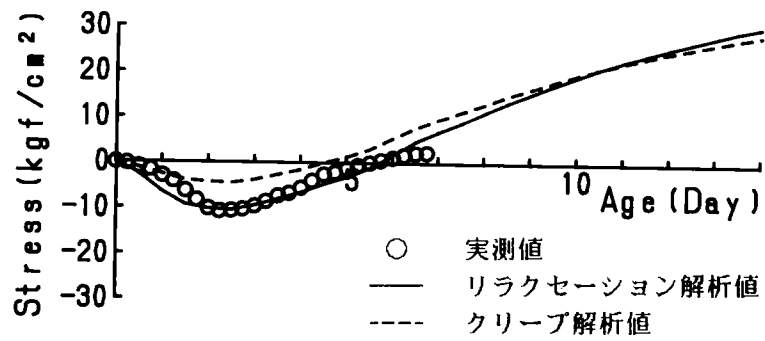


図5-9 壁(A)底部中心の温度応力

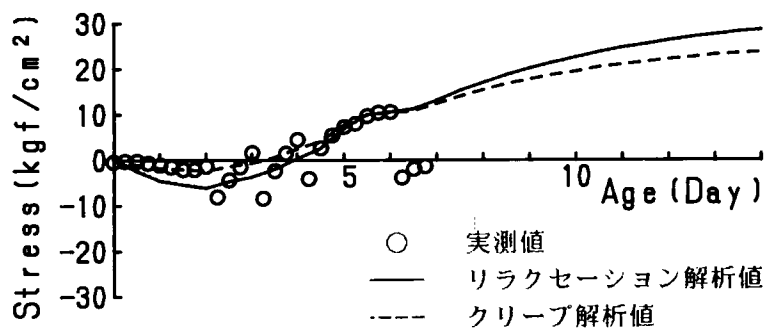


図5-10 壁(A)頂部表面の温度応力

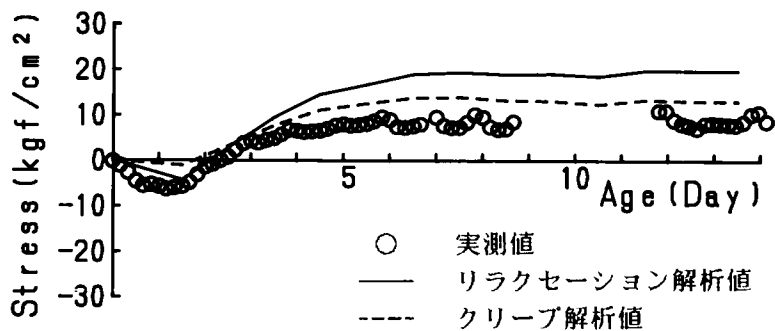


図5-11 壁(B)中央中心の温度応力

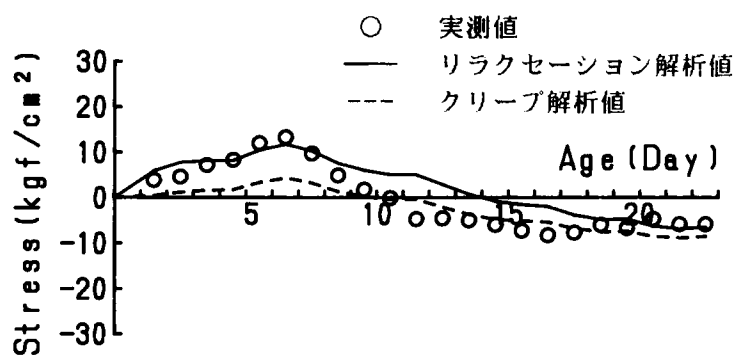


図 5 - 1 2 橋脚中央表面の温度応力

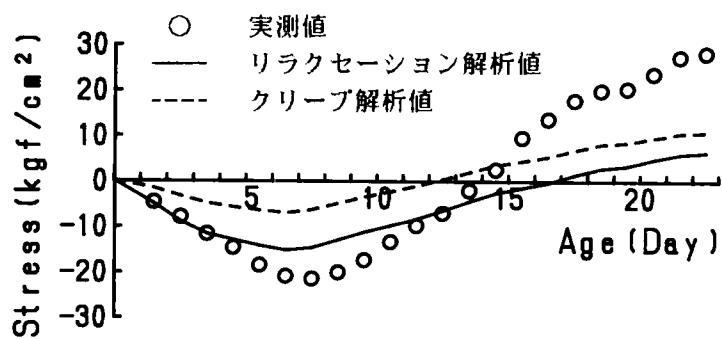


図 5 - 1 3 橋脚中央中心の温度応力

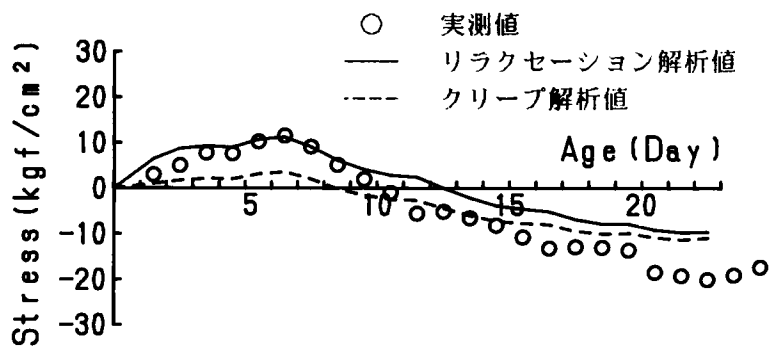


図 5 - 1 4 橋脚中央表面鉛直方向の温度応力

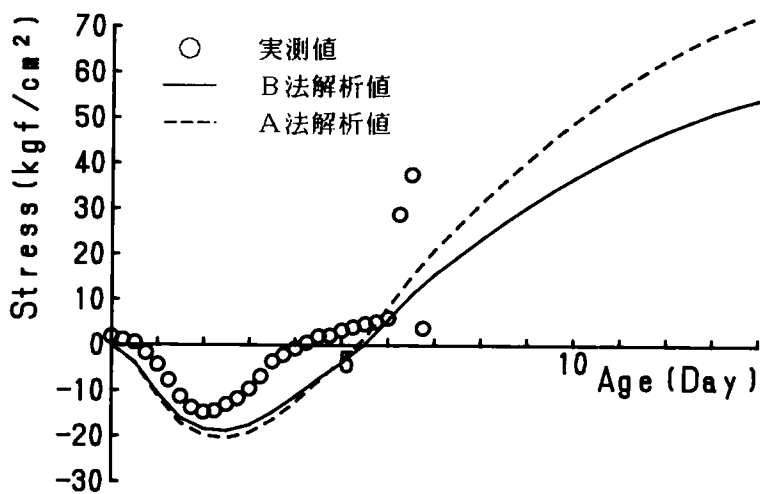


図 5 - 1 5 壁 (A) 中央中心の温度応力

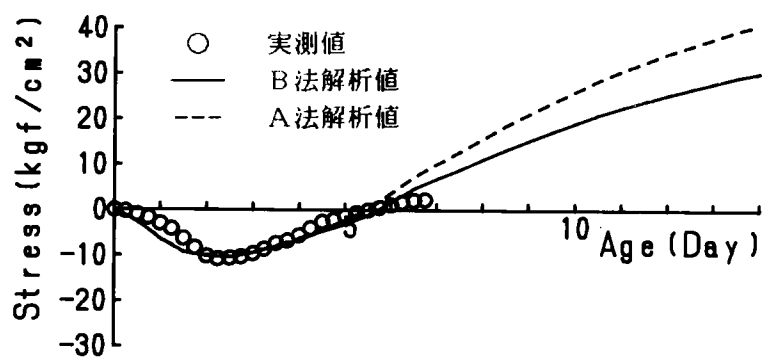


図5-16 壁(A)底部中心の温度応力

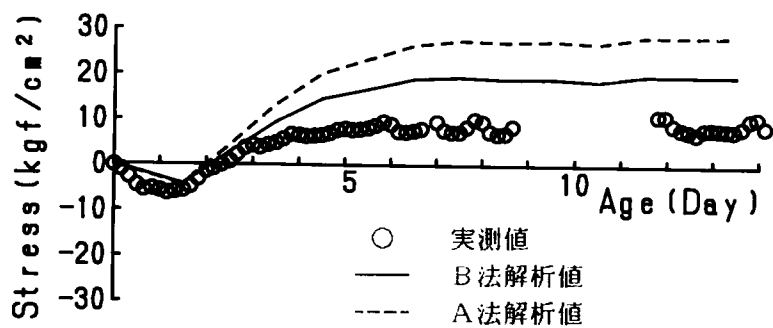


図5-17 壁(B)中央中心の温度応力

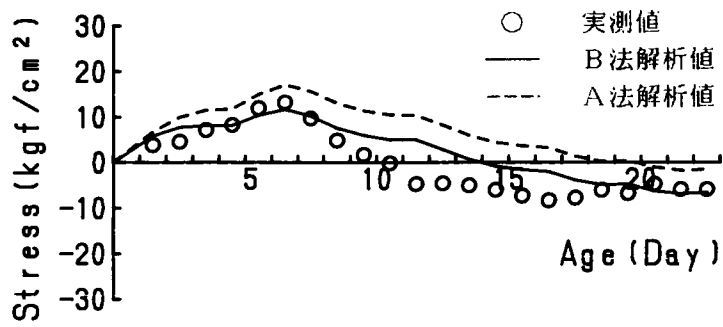


図5-18 橋脚中央表面の温度応力

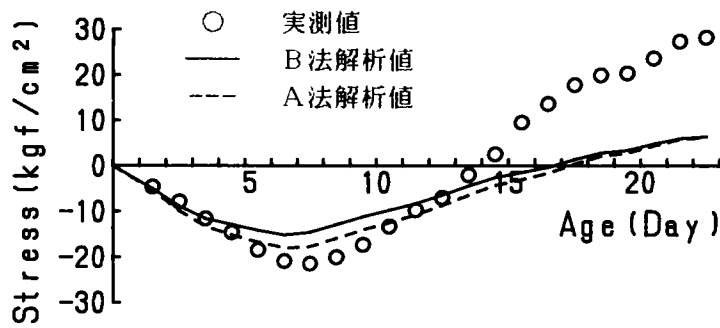


図5-19 橋脚中央中心の温度応力

第6章 CP法による温度応力のリラクセーション解析に関する研究

6.1 概説

CP(Compensation Plane)法およびCL(Compensation Line)法は、JCIマスコン委員会により提案された新しい温度応力の解析手法⁽¹⁾であり、昭和61年制定土木学会コンクリート標準示方書においても温度応力の簡便な計算方法として推奨されている。本手法の基本的な考え方は、従来からある内部拘束応力の算定法としての Compensation Line 法⁽²⁾における基本的な仮定である平面保持の仮定を、内部拘束に加えて、外部拘束を受ける場合についても拡張適用するところにある、その理論的な妥当性は、いくつかの実測データから確認されている⁽¹⁾。本手法は、今までに提案された各種の簡易解析法に比べ適用性および精度面においてすぐれた点も多く、かつ土木学会コンクリート標準示方書において推奨されているという背景などともあいまって、今後各種構造物の温度応力解析に用いられる機会が増えるものと考えられる。

さて、周知のように温度応力は、コンクリートの粘弾性的挙動によるリラクセーションの影響を大きく受けるため解析においてはこれを適切に考慮することが必要となる。第4章では、温度応力のリラクセーション解析に不可欠となる若材令コンクリートのリラクセーション特性を明らかにするとともに、その評価法を提案した。そして、つづく第5章では、リラクセーション関数を導入した有限要素法による温度応力のリラクセーション解析手法の有効性について明らかにした。また、第4章、5章で述べたように、リラクセーション関数は有限要素法などの厳密な温度応力解析だけでなく、温度応力の各種簡易解析法においても、リラクセーションを考慮する際に便利に用いることができ利点を有している。

本章では、第4章で得られた若材令コンクリートのリラクセーション関数を導入したCP法による温度応力のリラクセーション解析手法を提案するもので、解析手順の詳細ならびにコンクリート壁2例に対する解析結果と有効応力計による実測値および有限要素法の解析結果との比較、検討からその適用性を明らかにする。

6.2 CP法を用いた温度応力のリラクセーション解析

6.2.1 温度応力解析手法

温度解析は、有限要素法により実施した。温度解析手法と温度応力解析手法とが異なる場合、温度解析結果の温度応力解析への受渡しが効率よく行われるよう留意する必要がある。本研究ではこの点を考慮して、温度解析はCP法とのリンクが比較的容易な、J C I マスコン委員会作成の温度解析パソコンプログラム⁽³⁾（日電製PC9801シリーズ用）により実施した。

6. 2. 2 CP法⁽¹⁾

温度応力は、その発生メカニズムにより内部拘束に起因するものと外部拘束に起因するものの2つに大別され、前者を内部拘束応力、後者を外部拘束応力と呼んでいる。

温度応力の簡易解法では、内部拘束応力と外部拘束応力の2つの応力の和として温度応力を評価するものが多い⁽⁴⁾。CP法においても、この点については従来法と基本的には変わることはないが、一連の計算課程の中で2つの応力を同時に算定できるようになっている。

さて、CP法の最大の特徴は、温度変形に対する平面保持の仮定を、内部拘束に加えて、外部拘束をうける場合についても適用するところにある。以下にCP法の概略を説明する。

今、図6-1に示すような外部拘束のない矩形形状ブロックにおいて温度ひずみ $\alpha T(x,y)$ が生じた時、ブロックの温度変形に関して、端部付近を除けば平面保持の仮定が成立すると考えると、図に示すように中央部付近の鉛直断面AA'は温度変形後BB'となる。ここにおいて、変形後の断面BB'が Compensation Plane と呼ばれるもので、ブロックの自由な温度変形 $\varepsilon(x,y)$ を表している。そして、断面の図心軸Gにおける変形前の断面AA'と Compensation Plane との距離 $\bar{\varepsilon}$ が軸方向変形を、そして Compensation Plane の傾き ϕ が曲げ変形成分を表している。Compensation Plane は $\bar{\varepsilon}$ と ϕ から決定されるが、これらは温度ひずみ $\alpha T(x,y)$ から求めることができる。すなわち、ブロックの変形後において残留する応力（内部拘束応力）の図心に関する軸力Nと曲げモーメントMは、それぞれ

$$N = \int_A \varepsilon(x,y) E dA - \bar{\varepsilon} E A = \int_A \alpha T(x,y) E dA - \bar{\varepsilon} E A \quad (6-1)$$

$$M = \int_A \varepsilon(x,y) E y dA - \int b E \phi y^2 dy = \int_A \alpha T(x,y) E y dA - \int b E \phi y^2 dy \quad (6-2)$$

である。ただし、yは図心位置からの距離である。

ここで、ブロックには外部拘束が作用していないから、釣合い条件から次式が成立する。

$$N = 0 \quad (6-3)$$

$$M = 0 \quad (6-4)$$

式(6-3)，式(6-4)から、 $\bar{\epsilon}$ および ϕ が次式のように求められる。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\alpha T(x, y) E d A}{E A} \quad (6-5)$$

$$\phi = \frac{\alpha T(x, y) E y d A}{b E y^2 d y} \quad (6-6)$$

このようにして、 $\bar{\epsilon}$ および ϕ が求まり Compensation Plane の位置が決定されると、内部拘束応力 $\sigma_i(x, y)$ は次式により算出することができる。

$$\sigma_i(x, y) = E \{ \alpha T(x, y) - \bar{\epsilon} - \phi y \} \quad (6-7)$$

さて、Compensation Plane はブロックの自由な温度変形を表すものであるから、逆に変形を完全に拘束すると、ブロックには

$$N_0 = \bar{\epsilon} E A \quad (6-8)$$

および

$$M_0 = \int b E \phi y^2 d y \quad (6-9)$$

なる大きさの断面力が発生すると考えられる。一方、外部拘束が作用しない場合は、明らかに

$$N_0 = 0 \quad (6-10)$$

および

$$M_0 = 0 \quad (6-11)$$

であり、外部拘束を受ける実際の構造物はこれら2つの状態の間にあるものと考えられる。しかも、前述のように平面保持の仮定が成立すると考えると、外部拘束効果を Compensation Plane

の変化、すなわち $\bar{\varepsilon}$ と ϕ の値の変化としてとらえ、これらにより外部拘束応力を評価することが可能となるのである。

今、図6-2において、外部拘束が全くないブロックにおける Compensation Plane の位置がBB'であったとする。一方、ブロックに外部拘束が作用したため、Compensation Plane の位置がBB'からCC'に変化したとする。このような Compensation Plane の位置の変化は、軸変形の変化 $\Delta\bar{\varepsilon}$ と曲率の変化 $\Delta\phi$ として表すことができる。そして、 $\Delta\bar{\varepsilon}$ と $\Delta\phi$ は軸力と曲げモーメントに変換することができるので、終局、外部拘束効果を拘束軸力 ΔN と外部拘束曲げモーメント ΔM としてとらえることができるのである。

ここで、この軸力 ΔN および曲げモーメント ΔM と、先に述べた完全拘束状態における外部拘束軸力 N_0 および外部拘束曲げモーメント M_0 との比を、それぞれ軸拘束係数 R_N および曲げ拘束係数 R_M と定義する。

すなわち、

$$R_N = \frac{M}{N_0} \quad (6-12)$$

$$R_M = \frac{M}{M_0} \quad (6-13)$$

この軸拘束係数 R_N と曲げ拘束係数 R_M は、ブロックの形状ならびにブロックと拘束体との剛性比等により変化するが、あらかじめこれらの要因をパラメータとして R_N 、 R_M を定めたおけば、式6-12、6-13より外部拘束軸力と外部拘束曲げモーメントを簡易に算定することができる。

このようにして、外部拘束軸力 ΔN と外部拘束曲げモーメント ΔM が求まると、外部拘束応力 σ_r は、はり理論による応力算定式によりつぎのように決定することができる。

$$\sigma_r = \frac{\Delta N}{A} + \frac{\Delta M}{I} y = \frac{R_N N_0}{A} + \frac{R_M M_0}{I} y \quad (6-14)$$

ただし、 A 、 I ：ブロックの断面積および断面2次モーメント

y ：図心からの距離

以上のようにして、内部拘束応力 σ_i と外部拘束応力 σ_r が求まると、温度応力 σ はこれらの和として次式より算定することができる。

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_r$$

(6-15)

なお、上述の外部拘束係数 R_N 、 R_H は、JCI マスコン委員会から同定されたもの⁽¹⁾を用いることができる。

6. 2. 3 CP法を用いたリラクセーション解析手法

CP法を用いたリラクセーション解析手法は、基本的には重ね合わせの原理を適用したものを考えた⁽⁵⁾。CP法によるリラクセーション解析手法の詳細を図6-3に示す。図において、まず適当な方法（有限要素法、差分法など）により部材各部の温度変化を求める。そして、この温度計算結果をもとに、CP法を用いて各タイムステップにおける弾性応力増分を求める。つぎに、得られた弾性応力増分について、リラクセーション関数をもとに各タイムステップにおける応力緩和を評価する。このような過程を経た後、各ステップにおいて残留応力のつり合い条件が満足されるよう、CP法により応力の再配分計算を行い最終的に各時点における温度応力を決定する。以上のように、本手法は

1. 温度解析 → 2. 弾性応力解析 (CP法) → 3. 応力緩和の評価 → 4. 応力再配分計算 (CP法)

の4過程からなる。本研究では、実際の計算にあたり温度解析は前述のように有限要素法により別途実施し、その後の弾性応力解析から最後の応力再配分計算までの一連の解析過程は、JCI マスコン委員会作成のCP法による温度応力解析パソコンプログラム⁽³⁾を基本とし、これに応力緩和に関する処理を追加した計算プログラム (NEC PC9801シリーズ用) により実施した。一方、比較のため実施した有限要素法によるリラクセーション解析では、構成式表示にCP法で用いたものと同様のリラクセーション関数を用いた。また、解析手法の詳細は5. 2. 1で述べた通りである。

6. 3. 解析対象構造物

本章で解析を行った2体のコンクリート壁は第5章で解析対象としたものと同じものである。ここでは、構造物の概要のみを述べるにとどめる。解析を行った2体のコンクリート壁の形状、寸法ならびに温度、および応力測定用計器類の埋設位置をそれぞれ図6-4と図6-5に示す。以下、本文では図6-4の壁を壁(A)、一方図6-5の壁を壁(B)と呼ぶことにする。

図に示すようにいずれの壁も旧コンクリート上に打設されたもので、外部拘束をうける構造物

の典型例である。壁（Ａ）の長さ（Ｌ）と高さ（Ｈ）との比（Ｌ／Ｈ）は10.0また壁厚（Ｄ）は1.5mである。一方、壁（Ｂ）ではそれぞれＬ／Ｈ＝5.1，Ｄ＝0.8mである。表6－1～2に壁（Ａ）、壁（Ｂ）のコンクリート示方配合ならびに材令28日における力学的性質を示す。

6. 4 解析方法

CP法と有限要素法それぞれによる温度応力解析で用いた諸定数は、全て同一のものとした。

6. 4. 1 リラクセーション関数

リラクセーション関数には、第4章で得られた圧縮リラクセーション関数を用いた。以下に、式のみを改めて示しておく。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + C t}{A + t} \quad (6-16)$$

$$A = -8.25 \ln t + 23.52 \quad (t < 7 \text{ day}) \quad (6-17)$$

$$= 7.43 \quad (t \geq 7 \text{ day}) \quad (6-18)$$

$$C = 0.25 \ln t + 0.04 \quad (t < 7 \text{ day}) \quad (6-19)$$

$$= 0.07 \ln t + 0.40 \quad (t \geq 7 \text{ day}) \quad (6-20)$$

ここで、 t ：時間（hr）

σ_t ：時間 t での残留応力

σ_i ：初期載荷応力

A, C ：実験定数

6. 4. 2 その他の解析諸定数

壁（Ａ）、（Ｂ）それぞれの解析で用いた弾性係数は、第5章での解析と同一のものである。すなわち、壁（Ａ）では、

$$E_{(t)} = 0.351 \times \frac{t}{2.15 + t} \times 10^6 \quad (6-21)$$

一方、壁（Ｂ）では、

$$E(t)/E(28) = 1.55 \log_{10} t + 0.48 \quad (0.7 \leq t \leq 1.4) \quad (6-22)$$

$$E(t)/E(28) = 0.21 \log_{10} t + 0.68 \quad (1.4 < t \leq 41) \quad (6-23)$$

ただし、式(6-21)～(6-23)において

t ：材令(日)

$E(t)$ ：材令 t における弾性係数(kgf/cm²)

$E(28)$ ：材令28日における弾性係数(kgf/cm²)

コンクリートの熱膨張率は、 $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ (一定)とした。CP法では、旧コンクリートを拘束体と考えて解析を行った。その際、外部拘束係数についてはJCIマスコン委員会同定の図表より壁(A)では $R_N = 0.9$, $R_{N1} = 1.08$, $R_{N2} = 1.09$ 、一方、壁(B)では $R_N = 0.7$, $R_{N1} = 1.12$, $R_{N2} = 1.70$ とした。また、熱伝導解析で用いる諸定数は、第3章、3.2.1で示した方法により決定した。これらを、まとめて表6-3に示す。

6.5 解析結果および考察

6.5.1 温度解析結果

有限要素法による壁(A)と(B)の温度解析結果については、第5章、5.5.1で述べた通りである。

6.5.2 CP法による解析結果と有限要素法による解析結果の比較ならびに検討

リラクセーション解析結果の検討を行うにあたり、まず、リラクセーション解析の基本となる弾性解析について、CP法の結果と有限要素法の結果の比較を行う。図6-6と図6-7に、壁(A)、(B)それぞれの中央中心における温度応力についてのCP法と有限要素法による弾性応力解析結果を示す。図6-6から、壁(A)の中央中心の温度応力についての両解析結果は、極めてよく一致しており、両手法はほぼ同じ結果を与えている。

図6-7から、壁(B)では、壁(A)にくらべ両手法の解析結果にはやや大きな差異がみられ、CP法の方が若干大きな値を与えている。しかし、全般的には両解析値は良く合致しており両解析値の差異は5kgf/cm²以下におさまっている。以上の結果から、弾性応力解析レベルではCP法は有限要素法とよく合致する結果を与えることが確認できる。このような結果をふまえて、以下

にリラクセーション解析結果ならびに実測値についての比較、検討を行う。

図6-8～10に、壁（A）に対するCP法と有限要素法による温度応力解析結果のうち、壁中央中心、底部中心ならびに頂部表面における解析結果を、それぞれにおける実測値とあわせて示す。各図から、壁（A）に生じる温度応力は、いずれの部分においても温度上昇期に圧縮応力となり、以後温度降下に伴い引張応力へと移行していく傾向を示している。実測によると壁中央部中心において最も大きな応力が生じている。図6-8から、CP法と有限要素法の解析値を比較すると、両者は全般的によく合致しているがCP法の方がやや応力緩和を大きく評価する傾向にあり、有限要素法の解析値に対してCP法の解析値は18%程度の差異を生じている。中央中心での実測値とCP法ならびに有限要素法による解析値とを比較すると、実測値とそれぞれの解析値は全般的によく合致しており、たとえば最大圧縮応力度では実測値の 14.7kgf/cm^2 に対してCP法では 15.3kgf/cm^2 、有限要素法では 18.7kgf/cm^2 、また材令6日での引張応力度は実測値の 6.0kgf/cm^2 に対してCP法は 5.3kgf/cm^2 、有限要素法では 5.7kgf/cm^2 を与えている。図6-9から、底部中心においてもCP法と有限要素法は定性的にはよく合致した解析値を与えている。しかし、CP法は有限要素法にくらべ応力緩和量を中央中心よりさらに大きく評価する傾向にあり、有限要素法の解析値に対してCP法の解析値は最大50%程度の差異を生じている。ただし、材令初期における実測値との対応では、両解析値とも実測値に近い値を与えており、解析精度についての両者の優劣の判断はつけがたい。図6-10から、頂部表面においてもCP法は有限要素法にくらべ応力緩和量を大きく評価する傾向にあるが、実測値との対応においては、有限要素法による解析値と同様、良好な結果を与えている。

図6-11に、壁（B）中央中心における温度応力の解析値と実測値を示す。壁（B）に発生する温度応力は、壁（A）同様、外部拘束が卓越する場合の典型的な傾向を示している。CP法と有限要素法の解析値を比較すると、壁（A）同様、両者は定性的にはよく合致するもののCP法の方が応力緩和量を大きく評価しており、CP法は最大引張応力度では有限要素法の値に対して35%程度小さな値を与えている。しかし実測値との比較では、最大引張応力度について実測値の $9\sim 10\text{kgf/cm}^2$ に対してCP法では 12.6kgf/cm^2 、一方、有限要素法では 19.9kgf/cm^2 となっており、少なくとも有限要素法にくらべ実測値との対応が悪いという結果とはなっていない。以上、壁（A）ならびに壁（B）の解析から、弾性応力解析ではCP法は有限要素法とよく合致する結果を与えるが、リラクセーション解析では有限要素法にくらべ応力緩和量を大きく評価する傾向にある。しかし、実測値との対応では、誤差が $3\sim 4\text{kgf/cm}^2$ 程度で、少なくとも有限要素法と同程度の精度が期待できることなどが示された。

6.6 まとめ

本章では、CP法を用いた温度応力のリラクセーション解析手法を提案し、その適用性を実測値ならびに有限要素法の解析結果との比較、検討から明らかにした。

本章で得られた結論を要約すれば次のようになる。

(1) 若材令コンクリートのリラクセーション関数をCP法に導入することにより、温度応力のリラクセーション解析を実用上十分な精度で行うことが可能である。

(2) CP法と有限要素法は、弾性応力解析レベルではほぼ同様の結果を与える。一方、リラクセーション解析では両者は定性的にはよく合致するものの、定量的にはCP法においては応力緩和量をやや大きく評価する傾向が認められた。

(3) コンクリート壁2例についてのCP法による温度応力リラクセーション解析値と実測値との差異は最大3~4kgf/cm²程度であった。一方、有限要素法による解析値と実測値との差異は最大10kgf/cm²程度となった。

(4) 本研究で取り扱ったような、比較的単純な形状の壁体構造物を対象とする場合、CP法によるリラクセーション解析の精度は有限要素法を用いた解析と少なくとも同程度のものが期待できる。

(参考文献)

- (1) マスコンクリートの温度応力研究委員会：外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力計算方法の提案，マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1985
- (2) 小沢章三：マスコンクリートの初期ひびわれとその防止対策に関する研究（Ⅰ），発電水力，57号，pp. 48~61，1962
- (3) マスコンクリートの温度応力研究委員会編：マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム，日本コンクリート工学協会，1985
- (4) たとえば、ACI Committee 207：Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Jour. , Proc. , Vol. 70, No. 7, pp. 445~489, 1973
- (5) 森本博昭，小柳 洽：Compensation Plane 法による温度応力のリラクセーション解析，コンクリート工学年次論文報告集 10-2, pp. 145~150, 1988

表6-1 コンクリート示方配合

	slump (cm)	s/a (%)	W/C (%)	単位重量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
壁 (A)	15	44	50	173	346	793	996
壁 (B)	8	44.7	55.5	163	294	813	1031

表6-2 コンクリートの力学的性質 (材令28日)

	壁 (A)	壁 (B)
圧縮強度 (kgf/cm ²)	321	288
引張強度 (kgf/cm ²)	—	21.7
弾性係数 (kgf/cm ²)	3.45×10^5	2.48×10^5

表6-3 コンクリートの熱的性質

	壁 (A)	壁 (B)
断熱温度上昇	$T = 55.1(1 - e^{-0.574t})$	$T = 37.8(1 - e^{-0.0731t})$
コンクリート 熱伝導率 (kcal/mh°C)	2.35	同左
コンクリート 比熱 (kcal/kg°C)	0.24	同左
熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	10.0(コンクリート面) 5.0(型枠面)	同左
コンクリート 打設温度(°C)	16	25

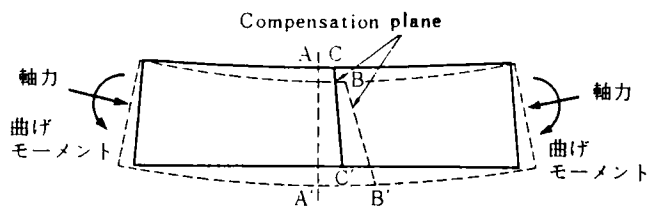


図6-1 外部拘束状態

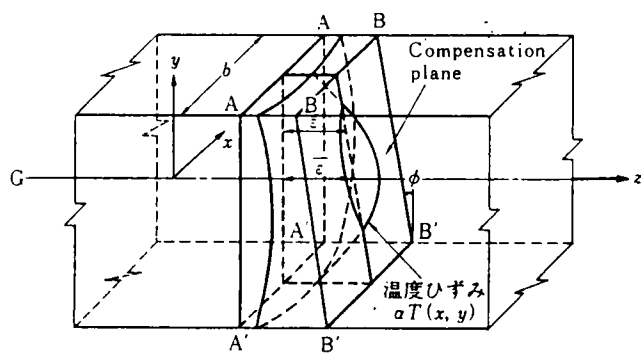


図6-2 Compensation Plane

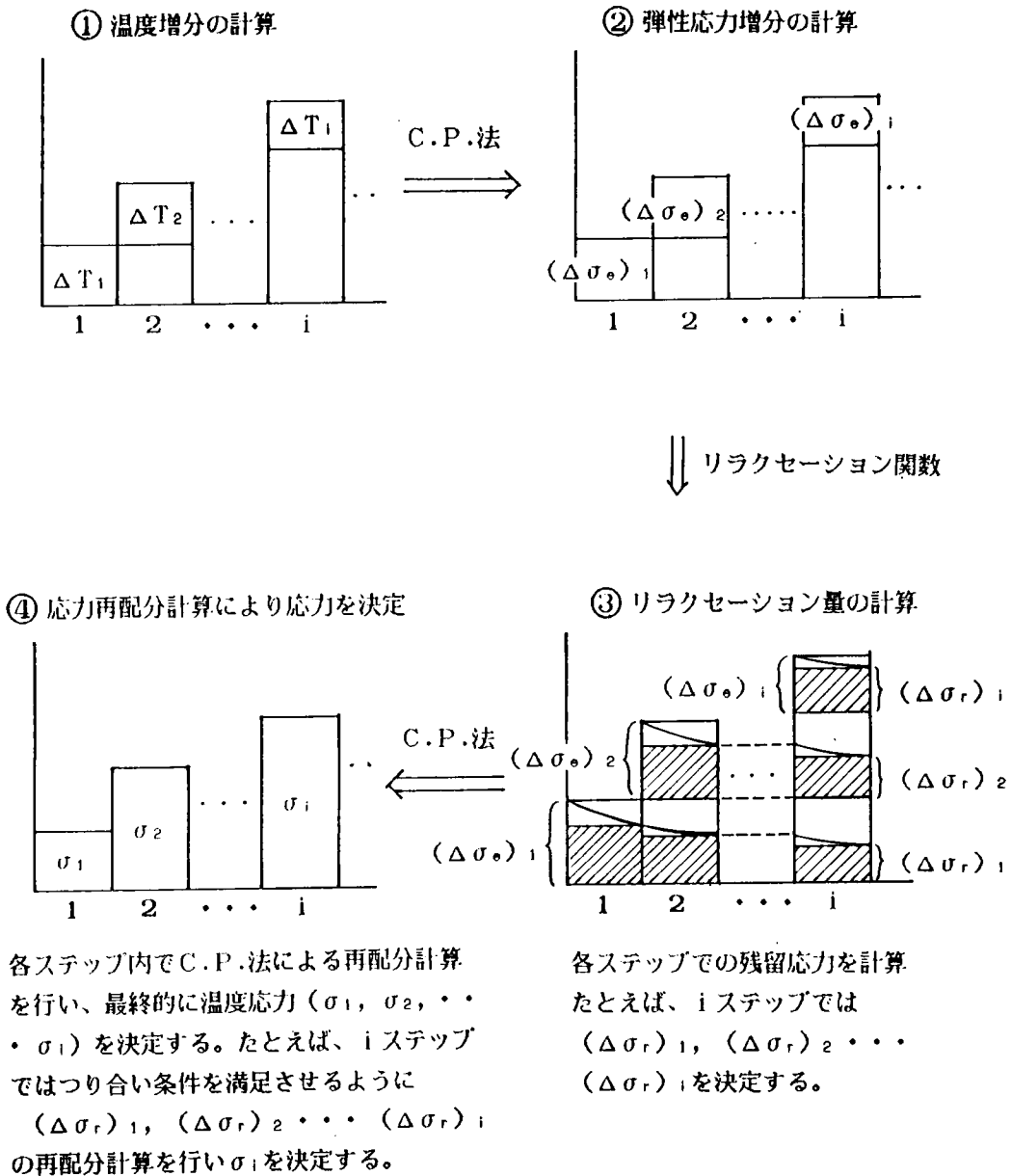


図6-3 解析手法詳細図

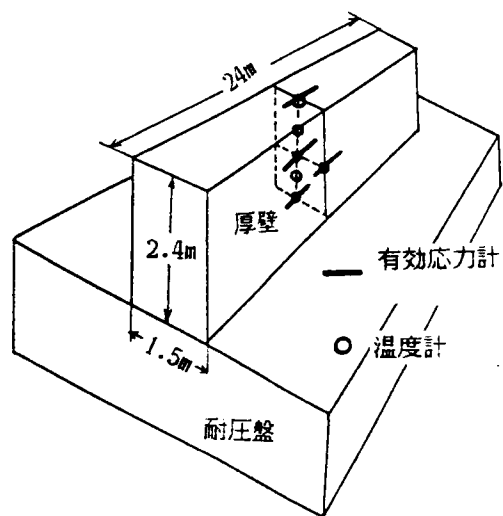


図6-4 壁 (A)

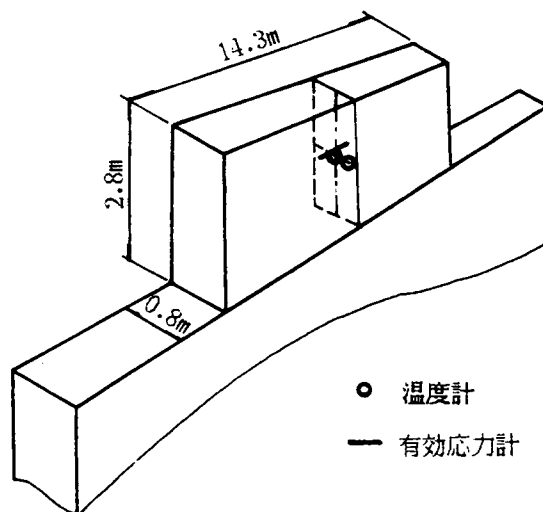


図6-5 壁 (B)

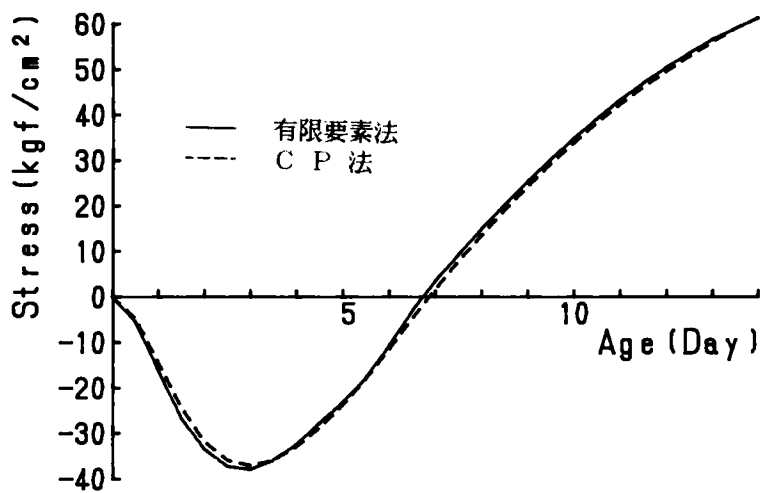


図6-6 応力の経時変化 壁(A) 中央中心

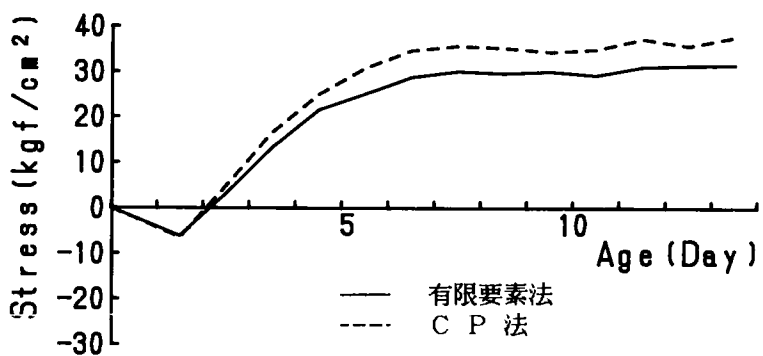


図6-7 応力の経時変化 壁(B) 中央中心

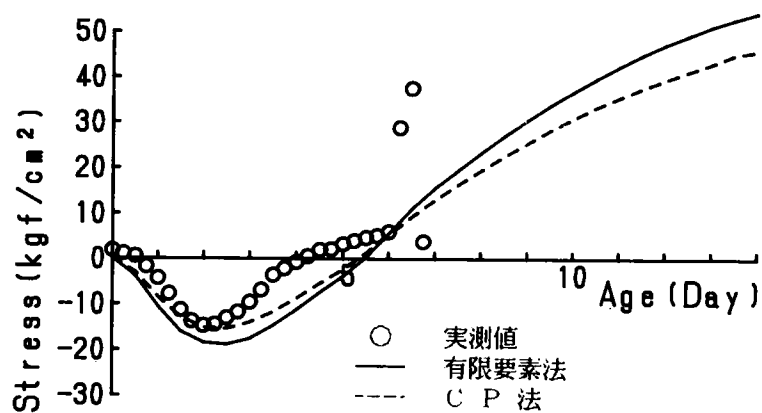


図6-8 応力の経時変化 壁(A) 中央中心

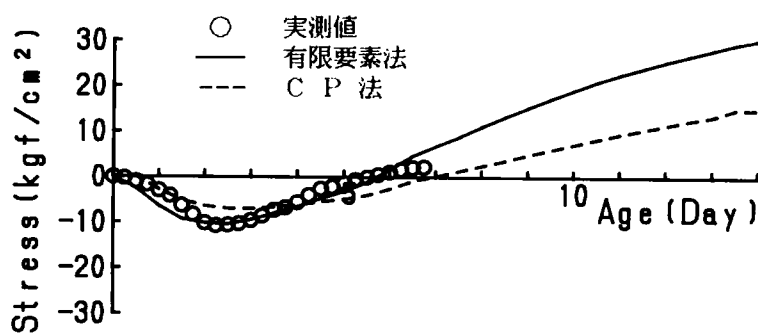


図6-9 応力の経時変化 壁(A) 底部中心

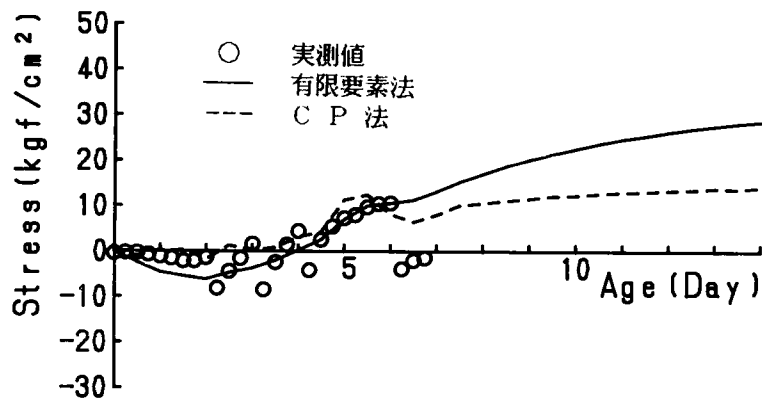


図6-10 応力の経時変化 壁(A) 頂部表面

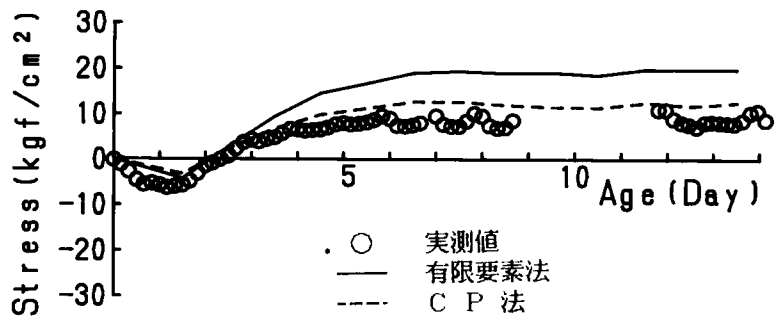


図6-11 応力の経時変化 壁(B) 中央中心

第7章 結論ならびに謝辞

マスコンクリートにおける温度応力ならびに温度ひびわれ問題は、現在ではもはや古典的な問題の部類に属するものである。しかしながら、この問題は、今なおコンクリート工学における最重要課題として、多くの研究者により多岐にわたる研究が精力的に進められている。このことは、温度応力および温度ひびわれ問題がいかに多くの困難な課題を含み、かつ奥の深いものであるかを示すものである。今日までに、数多くの先達により研究が行われ、現在も問題克服への着実な歩みを重ねつつあるが、まだ未解決な点あるいは検討の不十分な点が多々残されているのが現状である。

本研究は、マスコンクリートにおける温度応力ならびに温度ひびわれに関連する諸課題のうち、温度ひびわれ防止および制御に関する技術を確立する上で特に重要でありながら、現在までに理論的ならびに実験的な究明が不十分であった諸点について検討を行ったものである。本研究は、次の3項目を主目的とし、これらについての理論的および実験的なアプローチを試みたものである。

- (1) 温度ひびわれ危険度評価におけるばらつきの解明と適用性の検討
- (2) 若材令コンクリートのリラクセーション特性の解明とその評価法の提案
- (3) リラクセーション関数を用いた温度応力のリラクセーション解析手法の提案

以下に、本研究で得られた研究成果を要約するとともに、今後に残された諸課題を指摘して本論文の結論とする。

第1章では、マスコンクリートの温度応力ならびに温度ひびわれに関する研究の歴史的な流れを概観して、現在でもなおこの分野における研究がコンクリート工学における最重要課題の一つであり、解決すべき問題点が多く残されていることを述べた。そして、現在に残された諸課題のうち、温度応力解析手法ならびに温度ひびわれ危険度評価手法の合理化と精度向上を計る上で特に重要と考えられる諸点を指摘して、本研究の目的と工学上の意義を明確にした。

第2章では、本研究に直接関連する研究分野、すなわち温度ひびわれ予測とこの基礎となる温度および温度応力解析、若材令コンクリートのリラクセーション特性、ならびに温度応力のリラ

クセーション解析などに関する既往の研究成果を系統的に整理するとともに、これらの研究における問題点を指摘して本研究と従来の研究との関係ならびに本研究の位置づけを明確にした。

第3章では、温度ひびわれの危険度を表す指数の値とひびわれ発生との対応、ならびに各指数の適用性などを、多数の構造物を対象とした有限要素法による温度ならびに温度応力解析および温度ひびわれ観察結果などから明らかにした。

まず、指数算出の基礎となる温度ならびに温度応力解析について、解析で必要となる諸定数の決定法および評価式に関する検討結果を明らかにするとともに、本章で用いた温度ならびに温度応力解析手法の精度を検証した。その結果、温度解析については、実測値との差が最大3～4℃、また、温度応力解析については、実測値に対する誤差が最大3～5kgf/cm²程度になることを確認した。ついで、温度ひびわれの危険度を表す指数として、応力と強度による指数、ひずみとひずみ能力による指数、土木学会提案の温度ひびわれ指数、および温度差および温度降下量による簡易的指数の計4種類を定義し、各指数の分布と温度ひびわれ発生との対応を検討した。

その結果、

(1) 応力と強度による指数を用いた場合、指数が0.6～1.2の範囲ではひびわれ有と無とが混在し、ひびわれの危険度について明確な評価を行うことは困難である。しかし、指数が1.2以上になると全ての例においてひびわれの発生が認められ、ひびわれ発生の危険度が極めて大きくなる。そして、逆に、指数が0.6以下の場合はひびわれの危険度が小さくなる。

(2) 土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、応力解析結果をもちいて算出した場合は、指数が1.54以上ではひびわれ発生の危険度が小さくなり、コンクリート標準示方書で示されたひびわれ防止レベルに対する指数の妥当性が裏づけられた。しかし、温度解析のみから簡易的に算出した場合は、指数とひびわれ発生との対応は必ずしも良好ではない。

(3) ひびわれが発生した構造物における最大温度差あるいは平均温度降下量は、ひびわれ無の1.4～1.5倍の大きさとなっており、これらに着目することによりひびわれ危険度の大きさの目安を得ることができる。

(4) ひずみとひずみ能力を用いた指数については、指数により定義したひびわれ発生域、ひびわれ危険域および安全域の各領域とひびわれ発生とは良好に対応する。

などの結論を得た。ついで、各指数の適用性を、ひびわれ発生有と無の指数が混在する割合により評価した結果、応力と強度による指数ならびに土木学会提案の温度ひびわれ指数のうち、応力

解析結果を用いて算出した指数の2つが、現段階では最も適用性に優れていることを明らかにした。

第4章では、温度ひびわれ危険度評価の基礎となる温度応力解析の精度を向上させるためには、コンクリート構成式の合理的な記述が不可欠であり、そのためにはリラクセーション特性を用いるのが有利であることを指摘した上で、若材令コンクリートの圧縮ならびに引張ひずみ拘束下におけるリラクセーション特性を実験的に明らかにした。そして、得られた実験データを解析することにより、これらの合理的な評価法を提示した。さらに、クリープデータを用いたリラクセーション特性の推定法およびリラクセーション試験における供試体拘束条件の影響についても検討を加えた。

まず、圧縮ならびに引張リラクセーション特性とこれらにおよぼす載荷応力レベル、載荷材令ならびに配合の影響などに関して次の知見を得た。

(1) 載荷応力レベルが強度の80%程度の範囲内では、応力緩和率は載荷応力にかかわらずほぼ一定である。

(2) 載荷材令が大きくなるに伴い終局緩和量は小さくなり、1/2緩和時間あるいは緩和終結時間は短くなる。ただし、引張リラクセーションにおいては、圧縮リラクセーションにくらべ載荷材令の影響が小さい。

(3) 配合の影響については、載荷応力比が一定の条件下で水セメント比が50%から60%へと増加すると同時に、単位セメント量が 346kg/m^3 から 272kg/m^3 と減少した場合、圧縮リラクセーションでは、終局緩和量が7~8%程度増加するにとどまり、一方、引張リラクセーションではほとんど変化がない。すなわち、クリープ特性と同様、載荷応力比が一定の場合はリラクセーション特性におよぼす配合の影響は小さい。

(4) リラクセーション特性は、クリープ特性に比べてかなり短期終結性で、圧縮下では載荷後100時間程度、一方、引張下では2~3時間でそれぞれ緩和がほぼ終結する。

(5) 引張下における終局緩和量は、圧縮下の0.27~0.4倍、また1/2緩和時間は0.01~0.04倍程度である。すなわち、引張リラクセーションは、圧縮リラクセーションにくらべ応力緩和量が少なく、またかなりの短期終結性を示す。

以上のような、圧縮ならびに引張リラクセーション特性に関する知見と実験データをもとに、

リラクセーション特性を評価するためのリラクセーション関数として、圧縮、引張ともに同型の双曲線型の実験式を用いることが可能であることを示し、実験式中の定数を、圧縮、引張それぞれについて、載荷材令の関数として提示した。また、リラクセーション試験における供試体拘束条件が試験結果に与える影響に関して、拘束体と供試体との剛比は終局緩和量に影響を与えるが、緩和率の進行にはほとんど影響を与えない。そして、剛比が10程度以上であれば、完全拘束状態で得られる終局緩和量に対する誤差を15%程度以内に抑えることができ、実用上十分な精度が期待できることなどを明らかにし、リラクセーション試験における実験方法の検討および実験データの整理において有用となる資料を与えた。さらに、リラクセーション特性の推定手法について、材令3日以前のごく初期の材令を除けば、Troost の変形式により圧縮クリープデータから圧縮リラクセーション特性を、実験値に対する誤差±10%程度の精度で推定できることを示した。

第5章では、第4章で得られたリラクセーション関数により記述したコンクリート粘弾性構成式を導入した、有限要素法による温度応力のリラクセーション解析手法を提案した。そして、本手法と実測値ならびにクリープ関数を用いた一般的手法との比較、検討から、本手法の有用性を明らかにした。

まず、温度応力のリラクセーション解析において、コンクリート粘弾性構成式表示にリラクセーション関数を用いた手法（リラクセーション解析手法）の有効性を、従来からのクリープ関数を用いた手法（クリープ解析手法）との比較において強調した後、リラクセーション解析手法の要点を述べた。特に、圧縮リラクセーション特性と引張リラクセーション特性の相違を考慮した解析については、異方性材料に対する取り扱いに準じた解析手法を具体的に提示した。ついで、第4章で得られたリラクセーション関数を用いて3例のマスコンクリートについての温度応力のリラクセーション解析を実施し、実測値ならびにクリープ解析手法による解析値との比較、検討から、

（1）クリープ解析では、応力緩和量の評価がリラクセーション解析にくらべ大きくなる傾向にあり、著しい場合は、クリープ解析値はリラクセーション解析値の25%程度の値を示す。

（2）実測値との対応では、リラクセーション解析値は、特に材令初期で実測値とよく合致する結果を与えた。一方、クリープ解析値は、特に材令初期で実測値との対応が悪くなる傾向にある。

（3）リラクセーション解析手法は、実測値との全般的な対応などから、クリープ解析手法と同等以上の精度および実用性を有し、しかも理論面では構成式を簡明に記述できる点で有利である。

（4）リラクセーション解析において、作用応力の正負によるリラクセーション特性の変化を考

慮した場合、温度ひびわれ予測において重要となる引張応力を大きく評価する傾向にあるので、今後さらに検討を進めて行く必要がある。

などの諸点を明らかにした。

第6章では、若材令コンクリートのリラクセーション関数を導入した、CP法による温度応力のリラクセーション解析手法を提案した。第4章において、リラクセーション関数の利点の1つとして、温度応力の簡易解析法においても便利に用いることができることを指摘した。本章では、温度応力の簡易解析手法として、最近注目をあびているCP法を取り上げ、本手法にリラクセーション関数を導入した温度応力のリラクセーション解析手法の提案を行った。コンクリート壁2体についての解析ならびに検討から、CP法による解析結果と実測値との差異は $3\sim 4\text{ kgf/cm}^2$ 以内に収まり、有限要素法にくらべ少なくとも同程度の精度を期待できることなどを示して、本手法が温度応力のリラクセーション解析手法として有用であることを明らかにした。

以上、本論文では、温度ひびわれ危険度評価に関しては温度ひびわれの危険度を表す指数のばらつきを明らかにし、従来の確定論的な評価を一步進めて、ばらつきを考慮した評価を行うことを可能にした。しかし、ひびわれの危険度を確率的に取り扱うまでには至っておらず、今後さらに多くの資料の蓄積と検討が必要である。温度応力のリラクセーション解析に関しては、リラクセーション関数を用いた解析手法の有用性を明らかにすることができたが、中、長期材令においては、実測値との対応が悪くなるなどの問題点も残された。今後、精度のよい現場実験を重ねて、さらに多くの資料にもとづく検討が必要である。また、これと並行して、温度応力の測定に用いる有効応力計の機構および精度面からの検討も必要である。温度応力のリラクセーション解析手法で用いる若材令コンクリートのリラクセーション特性について、本論文においてはその評価手法の提案を行ったがコンクリートのリラクセーション特性については興味ある課題が数多く残されており、特に温度の影響、湿度の影響、高ひずみ負荷時の特性、あるいは圧縮下の特性と引張下の特性の相違に関連したこれらの生成機構などは、今後に残された重要な課題である。

また、温度ひびわれ対策に関しては、最近、鉄筋、目地あるいはプレストレスによりひびわれの発生位置および巾などを制御しようとする試みが盛んとなりつつあるが、わが国においてはこの方面の研究は端緒を開いたばかりである。温度ひびわれ制御は、温度ひびわれ防止と並んで温度ひびわれ問題を解決するための有力な手法であり、今後、精力的に取り組むべき課題である。

最後に、本研究は、温度ひびわれ危険度の評価手法ならびに温度応力のリラクセーション解析手法に関して重要と考えられる諸事項について、実験的ならびに理論的な検討を加えたものである。本研究で得られた成果が、温度ひびわれ防止ならびに制御技術の確立にいささかでも役立てば幸いである。

謝 辞

本論文は、筆者が岐阜大学工学部および岐阜大学工業短期大学部に勤務している間に行った、マスコンクリートの温度応力に関する一連の研究をまとめたものである。

本研究を実施するに際し、終始御厚情ある御指導、御鞭撻を賜り、本論文をまとめる機会をお与えいただきました京都大学教授 藤井 学博士ならびに岐阜大学教授 小柳 治博士に対し心より御礼申し上げます。

また、京都大学名誉教授 岡田 清博士には、研究の途上において数々の御指導を賜りました。ここに、心より御礼申し上げます。そして、元岐阜大学教授 故 大浜文彦博士には、筆者が岐阜大学において、コンクリート工学に関する研究を開始する機会をお与えいただくとともに、数多くの御教示を賜りました。ここに、心からの謝意を表します。本論文は、これらの先生方のご指導の賜であり、ここに重ねて御礼申し上げます。

また、大阪工業大学教授 小林和夫博士、ならびに名古屋大学教授 田辺忠顕博士の両先生には、研究の途上において数々の御討議と御教示をいただきました。ここに、厚く御礼申し上げます。

さらに、本論文をまとめる段階において京都大学講師 宮川豊章博士ならびに、岐阜大学助教授 六郷恵哲博士に御討議をいただきました。ここに、厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究の実験、解析、資料整理等に御協力頂いた岐阜大学コンクリート研究室の諸兄、ならびに岐阜大学工業短期大学部 近藤照子氏に深く感謝いたします。

正 誤 表

ページ	行	誤	正
9	下 8	位置づけ	位置づけ
10	上 15	0.002~0.006m ²	0.002~0.006m ² /h
10	下 9	(9) (10)	(9) (10)
11	下 10	増大することもあり、	増大する。
12	上 16	特徴づけられるが	特徴づけられるが
45	下 15	Z.P.Bazant	Z.P.Bazant
48	下 9-10	生来的	本質的
48	下 5	採用してあり	採用しており
51	上 12	打ち込み温度	打ち込み温度
67	下 10	指数の、全指数	指数の数の、指数総数
69	下 1	指数の、全指数	指数の数の、指数総数
100	式 (4-4 a)	(t<168hr)	(24hr≤t<168hr)
100	式 (4-5 a)	(t<168hr)	(24hr≤t<168hr)
101	下 13	ただし、T<168	ただし、24≤T<168
105	式 (4-9)	(4-9)	(t≥24) (4-9)
105	式 (4-10 a)	(t<72hr)	(24hr≤t<72hr)
121	図4-9 X軸の原点	0	1
137	下 4	小さいと考えられ、	小さいので、
139	式 (5-4)	$[D_r] = \frac{1}{1-2\nu} \times$	$[D_r] = \frac{1}{1+\nu} \times$
181	上 2	位置づけ	位置づけ
182	上 3	危険度評価	問題検討
182	上 13	80%程度	80%以下